



UNIVERSIDAD DE
GUANAJUATO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

**EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A EVENTOS DE
INUNDACIÓN EN UNA ZONA URBANA EN EL CONTEXTO
DE UN CLIMA CAMBIANTE.**

Tesis para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias del Agua

Presentado por:

Alexander José Díaz Buelvas

Director:

Dr. Ismael Orozco Medina

Codirector:

Dr. Jesús López de la Cruz

Agosto 2023

*"No pretendas apagar con fuego un incendio, ni
remediar con agua una inundación "*

Fuente: Confucio filósofo chino -551—479 a.c.

Agradecimientos

- Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo económico otorgado para la realización de la Maestría en Ciencias del Agua.
- A la Universidad de Guanajuato por otorgarme la oportunidad de ser alumno de la Maestría en Ciencias del Agua.
- A la Dirección de Apoyo a la Investigación y al Posgrado por los apoyos económicos otorgados durante la estancia de investigación realizada en la Universidad de Colima.

Resumen

Las inundaciones asociadas a eventos extremos de precipitación son uno de los fenómenos que mayor devastación causa. Numerosos estudios apuntan a cambios notables en el fenómeno como consecuencia de la influencia del cambio climático. Estos efectos son ya evidentes en zonas urbanas como es el caso de la ciudad de León, México. En la zona urbana de León se ubican 14 cauces, lo cual hace que la población se encuentre expuesta a desastres naturales producidos por eventos climáticos extremos como lo son las inundaciones. En la presente investigación se lleva a cabo el modelado hidráulico-estocástico de la susceptibilidad a las inundaciones asociadas a eventos extremos de precipitación en el arroyo Las Liebres con la finalidad de determinar las zonas colindantes más vulnerables ante las inundaciones. La metodología combina el uso de un modelo hidráulico bidimensional y un modelo hidrológico para definir eventos extremos para diferentes periodos de retorno y valorar las zonas afectadas estableciendo parámetros estacionarios y no estacionarios del área de estudio.

Abstract

Floods associated with extreme precipitation events are one of the most devastating phenomena. Numerous studies point to notable changes in the phenomenon as a consequence of the influence of climate change. These effects are already evident in urban areas such as the city of León, Mexico. In the urban area of León there are 14 watercourses, which means that the population is exposed to natural disasters caused by extreme climatic events such as floods. In this research, hydraulic-stochastic modeling of the susceptibility to flooding associated with extreme precipitation events in the Las Liebres stream is carried out in order to determine the most vulnerable adjacent areas to flooding. The methodology combines the use of a two-dimensional hydraulic model and a hydrologic model to define extreme events for different return periods and to assess the affected areas by establishing stationary and non-stationary parameters of the study area.

Tabla de contenido

ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA.....	3
1.2. JUSTIFICACIÓN	4
1.3. HIPÓTESIS	5
1.4. OBJETIVO GENERAL	5
1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
1.6. ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	6
2. ANTECEDENTES.....	8
2.1. LAS INUNDACIONES Y SUS IMPACTOS	12
2.2. EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITACIÓN.....	17
2.3. MODELO HIDRÁULICO IBER®	19
2.4. MODELO HEC-HMS	21
2.5. ANÁLISIS DE FRECUENCIAS	23
3. METODOLOGÍA.....	25
3.1. CASO DE ESTUDIO	27
3.2. CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	29
3.2.1. Área de la cuenca	29
3.2.2. Longitud y pendiente del cauce principal	30
3.2.3. Tiempo de concentración.....	31
3.2.4. Pendiente media de la cuenca	32
3.2.5. Curva hipsométrica de la cuenca	32
3.2.6. Información climatológica	33
3.2.7. Precipitaciones máximas en 24 horas.....	34
4. MODELADO ESTOCÁSTICO E HIDROLÓGICO.....	37
4.1. ESTIMACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN DE DISEÑO	37

4.2. ANÁLISIS DE FRECUENCIA.....	40
4.2.1. Parámetros estacionarios	40
4.2.2. Parámetros no estacionarios	42
4.2.3. Tormentas sintéticas.....	45
4.5. MODELADO HIDROLÓGICO CON HEC-HMS.....	47
5. MODELADO HIDRÁULICO EN IBER®	52
5.2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO EN IBER®	53
5.3. GEOMETRÍA DEL MODELO.....	53
5.3.1. Imagen de fondo.....	54
5.3.2. Superficies de cálculo.....	54
5.3.3. Tipos de malla utilizada	55
5.3.4. Condiciones iniciales y de contorno	57
5.3.4. Usos de suelo en el modelo numérico.....	59
5.3.5. Tiempo de cálculo en IBER®.....	60
6. SUSCEPTIBILIDAD A LAS INUNDACIONES	61
6.1. MODELADO ESTACIONARIO	61
6.2. MODELADO NO ESTACIONARIO.....	65
6.3. AFECTACIONES EN VIALIDADES E INFRAESTRUCTURA CRÍTICA.....	67
7. CONCLUSIONES.....	71
BIBLIOGRAFÍA.....	72

Índice de figuras

Figura 1. Desglose de la frecuencia y las pérdidas por tipo de desastre en todo el mundo en 2021. (Fuente: informe de evaluación mundial de desastres naturales 2021).	¡Error! Marcador no definido.
Figura 2. Distribución de a) número de desastres, b) el número de muertes y c) las pérdidas económicas por tipo de peligro registrados en todo el mundo por décadas (fuente: OMM, 2021).	10
Figura 3. Evolución del costo de los desastres en México 2000-2020. (fuente: CENAPRED,2020).	11
Figura 4. Muestra un ejemplo de inundaciones fluviales en Alemania en el año 2021 (fuente: National Geographic).	14
Figura 5. Esquema de la metodología diseñado para realizar la presente investigación.	26
Figura 6. Ubicación del área de estudio (fuente: Google Maps).	28
Figura 7. Inundaciones generadas por el desbordamiento del arroyo Las Libres (fuentes: periódico Correo y el Son de León).	28
Figura 8. Modelo Digital de Elevaciones con tamaño de celda de 90x90 metros.	29
Figura 9. Cuenca de estudio y su red hídrica.	30
Figura 10. Curva hipsométrica de la cuenca de aportación al arroyo Las Liebres.	33
Figura 11. Ubicación de las estaciones climatológicas y polígonos de Thiessen.	34
Figura 12. curva de frecuencia de las precipitaciones.	39
Figura 13. Análisis de frecuencias de las precipitaciones máximas anuales en la estación 11095	41
Figura 14. Resultado del análisis de frecuencia para la función de distribución Gumbel Doble.	42
Figura 15. Resultados del análisis de frecuencia de Rstudio.	45
Figura 16. Construcción del modelo hidrógico de la cuenca de aportación al arroyo Las Liebres.	48
Figura 17. Modelo de cuenca para el arroyo las liebres.	49
Figura 18. Hidrogramas de crecida en el software HEC-HMS, resultados para el modelo del arroyo las liebres.	49
Figura 19. Hidrogramas de las avenidas para el modelo estacionario.	50
Figura 20. Hidrogramas de las avenidas para el modelo no estacionario	50
Figura 21. Modelo Digital del Terreno del arroyo Las Liebres.	53

Figura 22. Imagen de fondo Georeferenciada.....	54
Figura 23. Superficie de cálculo del área de estudio.....	55
Figura 24. Malla de tipo irregular para la superficie de cálculo.....	56
Figura 25. Tamaños de la malla para la superficie de cálculo.	56
Figura 26. Condiciones de contorno del modelo.	57
Figura 27. Condiciones de entrada.....	58
Figura 28. Condiciones de salida.....	58
Figura 29. Usos de suelo establecidos para los coeficientes de rugosidad.....	60
Figura 30. Campo de velocidades máximas alcanzadas con la.....	62
Figura 31. Mapa de profundidades máximas alcanzadas con la crecida para el	62
Figura 32. Campo de velocidades máxima alcanzadas con la crecida para el	63
Figura 33. Profundidades máximas alcanzadas con la crecida para el.....	63
Figura 34. Campo de velocidades máxima alcanzadas con la crecida para el	64
Figura 35. Profundidades máximas alcanzadas con la crecida para el.....	64
Figura 36. Campo de velocidades máxima alcanzadas con la crecida para el	65
Figura 37. Profundidades máximas alcanzadas con la crecida para el.....	66
Figura 38. Campo de velocidades máxima alcanzadas con la crecida para el	66
Figura 39. Profundidades máximas alcanzadas con la crecida para el.....	67
Figura 40. Profundidades máximas alcanzadas para el periodo de retorno de 2 años	68
Figura 41. Profundidades máximas alcanzadas para el periodo de retorno de.....	68
Figura 42. Profundidades máximas alcanzadas para el periodo de retorno de.....	69
Figura 43. Mapa de profundidad de agua para un periodo de retorno de.....	70

Índice de tablas

Tabla 1. Resumen de los daños y pérdidas materiales y económicas de los desastres en 2020. (fuente: CENAPRED, 2020).....	12
Tabla 2. Presenta la longitud y la pendiente del cauce principal.	31
Tabla 3. Longitud y pendiente media de la cuenca.	32
Tabla 4. Precipitaciones anuales en 24 horas, estación LEÓN DGE (11095).	35
Tabla 5. Determinación del periodo de retorno.	37
Tabla 6. Precipitaciones inferidas con el modelo de mejor ajuste en $Ax+b$	41
Tabla 7. Datos inferidos del Rstudio.....	42
Tabla 8.precipitaciones inferidas con el modelo GAMLSS.....	45
Tabla 9. Factor e para ecuaciones de Emil Kuishiling y C.E. Gransky.	46
Tabla 10. Escenario de tormentas para diferentes periodos	47
Tabla 11.Escenario de tormentas para diferentes periodos	47

Capítulo 1

1. Introducción

El agua es uno de los recursos naturales más valiosos de cualquier país debido a los beneficios sociales y económicos que se derivan de su consciente explotación; sin embargo, junto con las ventajas existen también situaciones extremas, como inundaciones y sequías (Zucarelli, 2013). Tanto el agua como el clima están asociados con fenómenos extremos, como las inundaciones y las sequías, que son consideradas como las catástrofes que han causado el mayor número de pérdidas humanas y económicas en el planeta en los últimos 50 años (ONU, 2021). Según la ONU (2021), sólo los desastres relacionados con el agua han causado cerca de 1.3 millones de personas fallecidas y representan el 50% de todas las catástrofes. En el caso de las inundaciones son consideradas como el peligro ambiental más común (Doocy et al., 2013). Se producen por una multitud de factores naturales y antropogénicos asociados a la densidad poblacional y el cambio climático (Duhana y Pandey 2013). Las inundaciones en áreas densamente pobladas son uno de los principales peligros naturales para la sociedad moderna (Hammond et al., 2015; Kreibich et al., 2014 ; Barredo , 2007). Las inundaciones de mayor magnitud se producen principalmente debido a intensas precipitaciones en un corto período de tiempo o a lluvias prolongadas sobre suelos ya saturados (Jonkman y Kelman 2005; Singh et al., 2011; Villarini et al., 2010). Las inundaciones son más frecuentes en zonas urbanas producto de la interrupción de los ríos, una urbanización intrusiva y por el aumento de la superficie impermeable en estas zonas (Chen et al., 2015; Marco y Cayuela 1994; Ahmad et al., 2019; Kumar et al., 2020).

En el contexto del cambio climático se proyecta que los eventos extremos se intensifiquen debido a los cambios en la termodinámica atmosférica (Huang, Swain y Hall, 2020 ; O'Gorman y Schneider, 2009; Pendergrass y Hartmann, 2014; Pfahl et al., 2017). Según Zand et al. (2023) el cambio climático y el calentamiento global pueden tener efectos directos

sobre los valores extremos del clima y las variaciones temporales y espaciales de estos eventos. Según Schar et al. (2016) cada vez hay más evidencia de que el cambio climático antropogénico conduce a una intensificación del ciclo del agua y los efectos asociados a eventos de precipitación intensa y extrema. Según Visser et al. (2023) es bien sabido que, como consecuencia del cambio climático, el aumento de las temperaturas está provocando que se intensifiquen los eventos extremos de precipitación, lo que provocará mayores inundaciones. El quinto informe de evaluación del IPCC (2013), concluye que es probable que la frecuencia y la intensidad de los eventos de precipitaciones intensas hayan aumentado en varias áreas, entre ellas América del Norte y Europa, y proyecta que los eventos de precipitaciones intensas en la mayor parte de las latitudes medias las masas terrestres y sobre las regiones tropicales húmedas serán más intensas y frecuentes a finales de este siglo. Estos cambios son importantes para una serie de impactos potenciales, incluidas las inundaciones, la erosión, los recursos hídricos, la agricultura y los ecosistemas. Sin embargo, proyectar la intensidad, frecuencia y la distribución espacio-temporal de los eventos extremos de precipitación no es una tarea compleja.

En cuanto a los impactos de las inundaciones productos de eventos extremos se tiene que durante las últimas décadas se informaron eventos de inundaciones repentinas graves en África occidental y central, que afectaron a millones de personas, destruyeron casas y edificios y provocaron decenas de muertes (Oficina de Coordinación de Asuntos Humanitarios de las Naciones Unidas, 2012, 2021). Otro ejemplo de ello, han sido las sufridas en Europa desde la década de 1990, en las cuencas del río Rin y sus afluentes (1993, 1995), en la región mediterránea (1994) y en Europa Central (1997). La inundación en el Rin en diciembre de 1993 causó la inundación de partes de las ciudades de Coblenza, Bonn y Colonia, y luego, en enero y febrero de 1995, otra gran inundación golpeó Alemania, el norte de Francia y los Países Bajos. Las dramáticas inundaciones devastaron grandes áreas en la República Checa, Polonia y la cuenca del Oder en Alemania en julio de 1997. Asimismo, se han producido grandes inundaciones en el Reino Unido, Italia, Francia y Suiza en el año 2000. El récord absoluto de la pérdida anual por inundaciones en Europa se observó en agosto de 2002, cuando el daño material superó los 20000 millones de euros, en valor nominal. Esta inundación dañó las ciudades históricas de Praga y Dresde. También se produjeron grandes

inundaciones en Europa en 2005, 2007 y 2010 (Kundzewicz, et al., 2013). Según el Índice Global de Riesgo Climático (2021), los países más afectados en las dos últimas décadas son Puerto Rico, Myanmar y Haití, que han sufrido las consecuencias de 161 eventos meteorológicos extremos, algunos de ellos muy devastadores: el huracán María (2017) en Puerto Rico; los huracanes Jeanne (2004) y Sandy (2012) en Haití y el ciclón Nargis en Myanmar (2008). En este periodo España ocupa el puesto 29. Los países de América Latina y el Caribe son mayormente afectados por eventos climáticos extremos, especialmente Puerto Rico, Honduras, Nicaragua, República Dominicana, Guatemala, México, Argentina, Cuba, Ecuador, Bolivia y Colombia. Cada año desde 2006, el número de desastres hidrológicos sigue representando la mayor parte de la ocurrencia de desastres naturales (Guha et al., 2017). Es de gran importancia analizar la resiliencia urbana frente a los episodios de inundaciones porque en estas zonas viven más de 4.034 millones de personas, 54% de la población del mundo, y se proyecta que para el año 2030 las áreas urbanas concentrarán el 60% de la densidad poblacional global (United Nations, 2016).

Con base en lo anteriormente expuesto, comprender las inundaciones fluviales es fundamental para la planificación urbana, la gestión de desastres y la protección de vidas y propiedades. La identificación de áreas propensas a inundaciones, el monitoreo del clima y la implementación de medidas de mitigación pueden ayudar a reducir los impactos negativos de las inundaciones fluviales. Además, el estudio de las inundaciones fluviales contribuye al desarrollo de estrategias de adaptación al cambio climático y a la mejora de la resiliencia de las comunidades frente a eventos extremos.

1.1. Descripción de la problemática

Las inundaciones en México son un fenómeno recurrente que afecta diversas regiones del país. Debido a su ubicación geográfica y a la presencia de diversos factores climáticos, como huracanes, frentes fríos y a eventos extremos de precipitación que producen inundaciones (Cenapred, 2019). Las inundaciones en México pueden tener múltiples causas, como la intensidad de las lluvias, la deforestación, la urbanización desordenada, la obstrucción de los cauces de los ríos, la falta de infraestructuras de drenaje adecuadas y la ocurrencia de eventos

extremos de precipitación, provocando grandes daños y pérdidas, y entre ellos, las inundaciones son los responsables de más afectaciones en la historia de la humanidad (Galbán, 2020). El Banco Mundial (2017), señala que en años excepcionales como 1998 y 2010, los daños ocasionados por inundaciones superaron los 40 billones de dólares. Asimismo, se prevé que, en las próximas décadas con el cambio climático, la urbanización, el crecimiento demográfico, el impacto de las inundaciones costeras, fluviales y pluviales, aumentará considerablemente. Sin embargo, existe la creciente tendencia mundial por ocupar áreas con riesgo de inundación para asentamientos urbanos (Borzi et al., 2020).

En el caso del Estado de Guanajuato, específicamente la ciudad de León presenta de forma recurrente inundaciones principalmente por la intensidad de las precipitaciones, especialmente durante la temporada de lluvias y en casos de tormentas tropicales o huracanes que impactan la región. Estas precipitaciones intensas pueden sobrepasar la capacidad de los sistemas de drenaje existentes y provocar inundaciones en las zonas bajas y calles de la ciudad. Otro factor que se observa y que contribuye a las inundaciones de la ciudad de León es la urbanización acelerada y la falta de un adecuado manejo del agua. El crecimiento urbano desordenado ha llevado a la construcción en áreas que antes eran campos de absorción natural, lo que dificulta el escurrimiento del agua y aumenta el riesgo de inundaciones. Agregado a lo anterior, se tiene un sistema hidrológico superficial con respuesta rápida debido a que las corrientes que bajan de la Sierra de Comanja se depositan en la Presa El Palote, para contener las aguas que inundaban a la Ciudad. El Río de los Gómez, afluente del Río Turbio, atraviesa la Ciudad de noroeste a suroeste; se le unen los arroyos Marichés y el Muerto, Los Castillos, Ojo de Agua de los Reyes, El Puerto Colorado, Las Canoas, El Rancho y la Virgen son corrientes que forman el Arroyo de Alfaro y siendo el arroyo las liebres una de las principales zonas de inundación del municipio (Protección civil 2018).

1.2. Justificación

Las inundaciones en México son un tema de fondo, pues en la actualidad son el fenómeno que causa más daños económicos en el país. Cifras del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) muestran que cerca de 41% del territorio nacional y 31 millones de

personas están expuestas a fenómenos hidrometeorológicos (Cervantes-Jaime et al., 2012). A pesar de lo mencionado anteriormente, en México existe una escasez de estudios que permitan comprender y mitigar adecuadamente este tipo de desastres. En el caso específico de la ciudad de León, la cual es la más importante del estado de Guanajuato, no es una excepción a esta situación. Es importante destacar que la magnitud de las afectaciones causadas por las inundaciones en la ciudad de León puede variar según la intensidad de las lluvias, el estado de las infraestructuras de drenaje y otras condiciones locales. Las autoridades locales y organismos de gestión de emergencias trabajan para prevenir y mitigar los impactos de las inundaciones a través de la mejora de la infraestructura, la implementación de sistemas de alerta temprana y la promoción de medidas de prevención y respuesta adecuadas. Sin embargo, en el caso de la ciudad de León, Guanajuato, existe una falta de respaldo de estudios precisos que brinden a las autoridades la información necesaria para tomar las mejores acciones en la reducción del riesgo y mitigación de los impactos de las inundaciones.

1.3. Hipótesis

La frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos en el caso de las inundaciones, afecta tanto a los ecosistemas y sectores sociales como a los sectores productivos ligados al buen funcionamiento de los servicios urbanos los cuales se podrán cuantificar con mayor precisión mediante un modelado hidráulico-estocástico que permita simular el flujo de los ríos ante eventos extremos de precipitación asociados a diferentes periodos de retorno.

1.4. Objetivo general

El objetivo de esta investigación es evaluar la susceptibilidad a las inundaciones de sistemas fluviales urbanos a través del modelado hidráulico-estocástico con la finalidad de reproducir de manera matemática la dinámica de los daños causados por diferentes escenarios de eventos extremos de precipitación. Este modelo proporcionará una herramienta invaluable para evaluar y comprender mejor los efectos de las inundaciones en los diferentes sectores,

facilitando así la toma de decisiones informadas para la gestión del riesgo y la planificación urbana.

1.5. Objetivos específicos

Los objetivos específicos de la presente investigación son los siguientes:

- Generar una base de datos hidrometeorológico y geográficos del área de estudio.
- Procesar los *inputs* y parámetros necesarios para la construcción del modelo hidráulico IBER
- Realizar un modelado estocástico mediante un análisis de frecuencias para proyectar los eventos máximos de precipitación.
- Realizar un modelado hidrológico con HEC-HMS para diferentes tormentas sintéticas y períodos de retorno.
- Realizar un modelado hidráulico del funcionamiento hidrodinámico e identificación de la infraestructura crítica afecta en el área de estudio.

1.6. Estructura de la tesis

La presente tesis se ha estructurado en siete capítulos que describen los principales componentes de la investigación.

CAPÍTULO 1. En este capítulo se introduce al lector sobre la problemática existente, la justificación, la hipótesis y los objetivos a desarrollar durante la investigación.

CAPÍTULO 2. Se presentan los avances en materia del modelado hidráulico de las inundaciones ante eventos extremos de precipitación.

CAPÍTULO 3. La metodología diseñada y propuesta para la investigación es presentada en este capítulo. Asimismo, se describen las herramientas matemáticas acopladas para lograr evaluar los efectos de las inundaciones fluviales.

CAPÍTULO 4. Se presenta la construcción del modelo hidrológico y el análisis estocástico realizado con la finalidad de proyectar los eventos máximos de precipitación y escurrimiento bajo diferentes periodos de retorno.

CAPÍTULO 5. Este capítulo se presenta la construcción y cálculo de los parámetros del modelo hidráulico en dos dimensiones.

CAPÍTULO 6. El capítulo presenta el análisis y discusión del modelado hidráulico-estocástico y sus efectos el área de estudio y las infraestructuras críticas.

CAPÍTULO 7. Finalmente, se muestran las conclusiones obtenidas a partir del desarrollo de la investigación.

Capítulo 2

2. Antecedentes

Según un análisis exhaustivo realizado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2021), las sequías, tormentas e inundaciones y fenómenos relacionados con el agua, han dominado la lista de catástrofes de los últimos 50 años en términos de pérdidas humanas y económicas. Las sequías prolongadas, han afectado a comunidades enteras, causando escasez de agua, pérdida de cultivos y daños a los ecosistemas. Las tormentas severas han dado lugar a fuertes vientos, lluvias intensas y granizo, causando daños estructurales, interrupción de servicios y riesgos para la vida humana. En el caso específico de las inundaciones, ocupan el primer lugar en términos de ocurrencia y números de muertes, provocando desbordamientos de ríos, desplazamiento de personas y una devastación significativa en áreas urbanas y rurales (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, informe de evaluación mundial de desastres naturales 2021). Estos eventos extremos de inundación representan una amenaza grave para la vida humana y causan daños generalizados en infraestructuras vitales, viviendas y entornos naturales. Según OMM (2021) en todo el mundo, el 44 % de los desastres estuvieron asociados a crecidas (crecidas fluviales en un 24 % de los casos y crecidas generales en un 14 %), y el 17 %, a ciclones tropicales. Los ciclones tropicales y las sequías fueron los peligros que con mayor frecuencia ocasionaron pérdidas humanas, dado que fueron la causa del 38 % y el 34 % de las víctimas mortales debidas a desastres entre 1970 y 2019, respectivamente (Figura 2). En cuanto a las pérdidas económicas, el 38 % se asociaron a ciclones tropicales, mientras que el 31% se debieron a diversos tipos de crecidas: un 20 % a crecidas fluviales, un 8 % a crecidas generales y un 3% a crecidas repentinas. La misma OMM (2021) que, de acuerdo con las dos metodologías de clasificación económica, de las Naciones Unidas y el Banco Mundial, revelan que la mayoría de las muertes registradas como

consecuencia de fenómenos meteorológicos, climáticos e hidrológicos extremos se produjeron en países en desarrollo, mientras que los países con economías desarrolladas sufrieron la mayor parte de las pérdidas económicas. Según la clasificación de países de las Naciones Unidas, el 91 % de las muertes registradas se produjeron en economías en desarrollo, mientras que el 59 % de las pérdidas económicas se registraron en economías desarrolladas. Según la clasificación de países del Banco Mundial, el 82 % de las muertes se produjeron en países de ingreso bajo y mediano bajo y la mayoría (88 %) de las pérdidas económicas se registraron en países de ingreso mediano alto y alto.

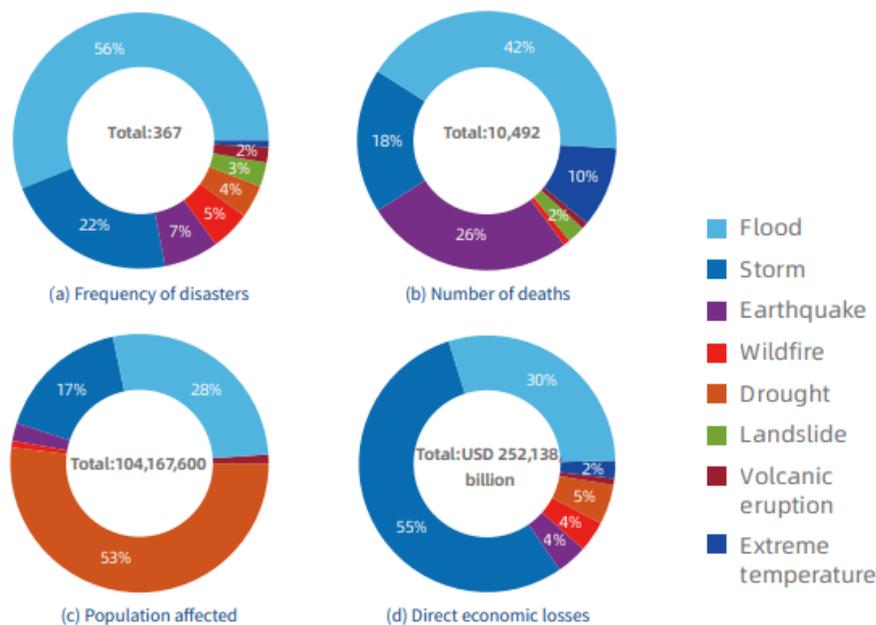


Figura 1. Desglose de la frecuencia y las pérdidas por tipo de desastre en todo el mundo en 2021. (Fuente: informe de evaluación mundial de desastres naturales 2021)

Según la OMM (2021), en el caso de América del norte, América Central y el Caribe se registraron 1,977 desastres, 74 839 víctimas mortales y pérdidas económicas por valor de 1,7 billones de dólares. En los últimos 50 años, esa región ha sido testigo del 18 % de los desastres de naturaleza meteorológica, climática e hidrológica acaecidos a escala mundial, el 4 % de las muertes asociadas y el 45 % de las pérdidas económicas conexas. Las tormentas

(54 %) y las crecidas (31 %) fueron la causa más frecuente de los desastres registrados. Las tormentas fueron las que más pérdidas humanas (71 %) y económicas (78 %) generaron en la región.

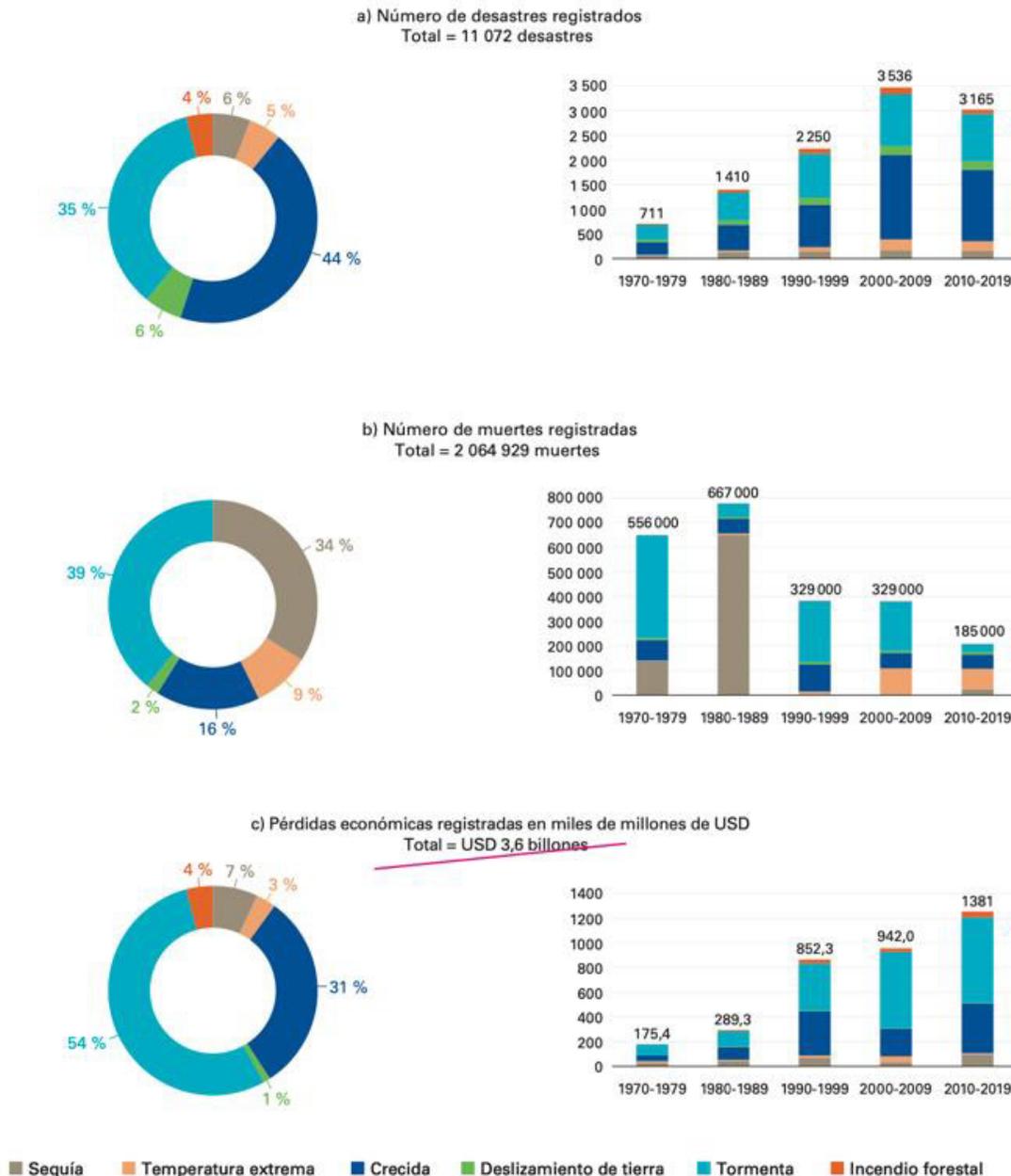


Figura 2. Distribución de a) número de desastres, b) el número de muertes y c) las pérdidas económicas por tipo de peligro registrados en todo el mundo por décadas (Fuente: OMM, 2021).

En el caso de México, según el resumen ejecutivo realizado por CENAPRED en el 2020. Se presenta la evaluación preliminar del impacto económico y social de los daños y pérdidas que causaron los desastres de origen natural y antrópico en el país a lo largo del año. El monto de los daños y pérdidas, considerando desde el año 2000 al año 2020, representa la octava mayor cifra con 32,736.3 millones de pesos, esto refleja un incremento casi 311% con respecto al año 2019 y equivale a 0.14% del PIB de 2020 (Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana et al, 2021).

La *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.* evidencia la evolución del valor de los desastres a precios corrientes para el periodo 2000-2020. Es notorio que los años 2010 y 2017 fueron los más costosos para el país en materia de desastres, debido a que durante 2010, los huracanes *Alex*, *Karl* y *Matthew* afectaron fuertemente el territorio nacional, dejando como saldo más de 92.3 mil millones de pesos. Para 2017, los sismos de septiembre (7 y 19) causaron grandes estragos en la población y en la infraestructura del país con más de 88.4 mil millones de pesos en daños y pérdidas (Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana et al, 2021).

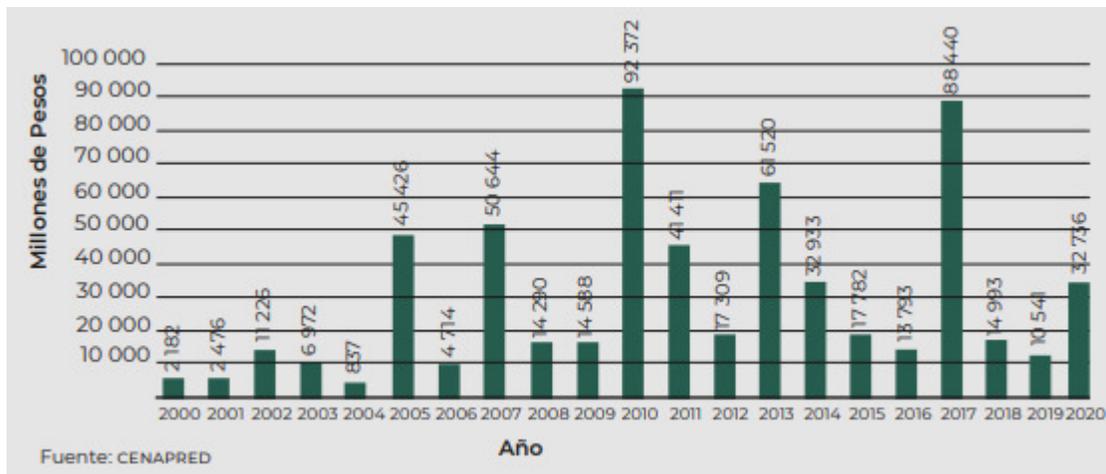


Figura 3. Evolución del costo de los desastres en México 2000-2020. (Fuente: Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana et al, 2021).

En términos generales, la Tabla resume las estadísticas que dejaron los fenómenos de origen natural y antrópico en México durante 2020 y es evidente que los desastres de origen hidrometeorológico fueron los que provocaron mayor destrucción en el país, ya que ocuparon

el primer puesto en viviendas, escuelas y unidades de salud dañadas, así como en el valor de los daños y las pérdidas (Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana et al, 2021).

Tabla 1. Resumen de los daños y pérdidas materiales y económicas de los desastres en 2020. (Fuente: Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana et al, 2021).

Fenómeno	Defunciones por fenómeno	Daños y pérdidas anuales (miles de pesos corrientes)	Viviendas dañadas	Escuelas dañadas	Hospitales afectados	Población afectada
Hidrometeorológicos	110	27108736	240688	537	11	789127
Geológicos	31	4916302.7	2354	69	21	3169
Químicos	80	56715.3	257	0	0	13554
Socioorganizativos	170	144578.6	2	0	0	2186
Sanitarios	1	5.4	0	0	0	87
Total	392	32763338	243301	606	32	808123

En México, en diversas localidades costeras, han ocurrido inundaciones severas a lo largo de su historia, varias se han estudiado a detalle. De los últimos quince años se tienen, por ejemplo, las sucedidas en Veracruz en 2005 y 2010 (Tejeda-Martínez, 2006 y 2011), en Tabasco en 2007 (Gama et al., 2010; Rivera-Trejo et al., 2010) y en Guerrero en 2013 (Pedrozo-Acuña et al., 2014). En contraste, el estudio de eventos extremos de precipitación e inundaciones en localidades dentro del continente se ha realizado para pocos sitios, por ejemplo: Ciudad de México (Magaña et al., 2013), Guanajuato (Matías-Ramírez et al., 2007), Ciudad Juárez (Dena-O., et al. 2012), etc.

2.1. Las inundaciones y sus impactos

Según el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2018), una inundación se define como el desbordamiento de un río o cuerpo de agua debido a la acumulación de agua que excede la capacidad de su cauce normal. Se produce cuando el volumen de agua que fluye hacia el río supera su capacidad de desagüe y se extiende sobre áreas adyacentes. Según el mismo IPCC (2018) existen diferentes tipos de inundaciones según su origen y características:

- **Inundaciones fluviales:** Ocurren cuando los ríos o corrientes de agua desbordan sus cauces debido a un exceso de agua que supera su capacidad de desagüe. Las inundaciones fluviales suelen ser causadas por eventos extremos de precipitación, deshielo rápido, obstrucciones en los cauces o una combinación de estos factores (Figura).
- **Inundaciones pluviales:** Son causadas por precipitaciones intensas en un corto período de tiempo, lo que resulta en un flujo de agua que no puede ser absorbido o drenado rápidamente por el suelo. Estas inundaciones se producen principalmente en áreas urbanas con pavimento y sistemas de drenaje insuficientes.
- **Inundaciones costeras:** Ocurren en zonas costeras debido al aumento del nivel del mar, tormentas marítimas o mareas ciclónicas. Estas inundaciones pueden ser causadas por fenómenos como huracanes, marejadas ciclónicas o tsunamis.
- **Inundaciones de embalses:** Se producen cuando un embalse o una presa alcanza su capacidad máxima y el agua se desborda. Estas inundaciones pueden ocurrir debido a fuertes lluvias, un mal manejo del embalse o el colapso de la estructura de la presa.
- **Inundaciones repentinas:** También conocidas como inundaciones flash, son inundaciones extremadamente rápidas y violentas que ocurren en áreas de terreno escarpado o en cañones estrechos. Estas inundaciones son causadas por lluvias torrenciales intensas en áreas montañosas, donde el agua puede acumularse y fluir rápidamente por las pendientes.



Figura 4. Muestra un ejemplo de inundaciones fluviales en Alemania en el año 2021 (Fuente: National Geographic).

Es posible que diferentes tipos de inundaciones se presenten como resultado un mismo evento de precipitación. Lo anterior, debido a que la intensidad, duración y distribución de las precipitaciones pueden influir y combinarse con diferentes factores, como la topografía, la capacidad de drenaje y la infraestructura existente, puede dar lugar a escenarios de inundaciones complejas y múltiples. La gestión adecuada de los recursos hídricos, la planificación urbana resiliente y los sistemas de alerta temprana son fundamentales para abordar los riesgos asociados con las diferentes formas de inundación que pueden resultar de la precipitación.

Las inundaciones pueden plantear diversas problemáticas y desafíos en diferentes aspectos. Algunas de las problemáticas más comunes asociadas a las inundaciones son las siguientes (Jonkman y Dawson, 2012):

- **Riesgo para la vida humana:** Las inundaciones pueden representar un peligro significativo para la vida humana. Las personas pueden quedar atrapadas en áreas

inundadas, sufrir lesiones o incluso perder la vida debido a la fuerza y el desplazamiento del agua.

- **Daños a la infraestructura:** Las inundaciones pueden causar daños graves a la infraestructura, como viviendas, edificios, puentes, carreteras y sistemas de drenaje. Las estructuras pueden colapsar o resultar comprometidas, lo que requiere costosas reparaciones y reconstrucciones.
- **Pérdida de bienes materiales:** Las inundaciones pueden provocar la pérdida y destrucción de bienes materiales, incluyendo muebles, electrodomésticos, vehículos y cultivos. Esto puede tener un impacto significativo en las personas y comunidades afectadas, tanto desde el punto de vista económico como emocional.
- **Desplazamiento de personas:** Las inundaciones pueden obligar a las personas a abandonar sus hogares y buscar refugio temporal o permanente en áreas seguras. El desplazamiento forzado puede generar problemas de alojamiento, acceso a servicios básicos y dificultades para la reintegración social.
- **Impacto en la salud pública:** Las inundaciones pueden aumentar el riesgo de enfermedades transmitidas por el agua, como la diarrea, el cólera y las infecciones cutáneas. El agua contaminada, la falta de saneamiento adecuado y las condiciones insalubres en los refugios temporales pueden contribuir a la propagación de enfermedades.
- **Impacto en el medio ambiente:** Las inundaciones pueden tener un impacto negativo en los ecosistemas acuáticos y terrestres. El desbordamiento de ríos y cuerpos de agua puede llevar a la contaminación del agua y la degradación del hábitat natural, afectando la biodiversidad y los ecosistemas.

En el caso de los desafíos asociados a las inundaciones son diversos y requieren una atención constante (Jonkman y Dawson, 2012):

- **Gestión del riesgo:** La gestión efectiva del riesgo de inundaciones implica identificar y evaluar las áreas vulnerables, implementar medidas de prevención y mitigación, y desarrollar planes de emergencia y evacuación. Uno de los desafíos es garantizar la coordinación entre las autoridades locales, los organismos de gestión del agua y la

comunidad, así como garantizar la financiación adecuada para implementar las medidas necesarias.

- **Cambio climático:** El cambio climático está alterando los patrones de precipitación y aumentando la frecuencia e intensidad de las lluvias. Esto plantea un desafío adicional para predecir y adaptarse a las inundaciones. Es necesario mejorar los modelos de predicción del clima y desarrollar estrategias de adaptación que consideren los posibles escenarios futuros.
- **Urbanización no planificada:** El crecimiento urbano no planificado y la ocupación de áreas de riesgo aumentan la vulnerabilidad a las inundaciones. El desafío radica en implementar una planificación urbana adecuada que considere la ubicación de infraestructuras críticas, las áreas de inundación natural y las restricciones para el desarrollo en zonas de alto riesgo.
- **Infraestructuras de drenaje insuficientes:** Muchas ciudades y comunidades carecen de sistemas de drenaje adecuados para manejar el exceso de agua durante eventos de lluvia intensa. El desafío consiste en mejorar y ampliar las infraestructuras de drenaje y canalización, así como implementar técnicas de gestión del agua basadas en la naturaleza, como los espacios de infiltración y la restauración de humedales.
- **Educación y concienciación:** La falta de conocimiento y concienciación sobre los riesgos y las medidas de prevención puede aumentar la vulnerabilidad de las comunidades frente a las inundaciones. Es necesario implementar programas de educación y concienciación para informar a la población sobre los peligros de las inundaciones, las medidas de preparación y las acciones a tomar durante y después de un evento de inundación.
- **Cooperación internacional:** Las inundaciones no conocen fronteras y pueden tener impactos transfronterizos. La cooperación internacional es fundamental para compartir información, experiencias y mejores prácticas en la gestión de inundaciones, especialmente en áreas donde los ríos y cuencas hidrográficas atraviesan múltiples países.

Finalmente, es importante mencionar la problemática y desafíos anteriores requiere de una combinación de enfoques técnicos, políticos y sociales, así como la participación activa de

los gobiernos, las comunidades y otras partes interesadas para promover la resiliencia frente a las inundaciones.

2.2. Eventos extremos de precipitación

Los eventos extremos de precipitación se refieren a episodios de lluvias intensas o torrenciales que superan los niveles normales de precipitación esperados en una determinada región o período de tiempo (Corona et al., 2023). Estos eventos pueden ocurrir en diferentes escalas, desde lluvias fuertes localizadas hasta sistemas de tormentas más amplios que afectan áreas extensas (Kukulies et al., 2023). El quinto informe de evaluación del IPCC (2013) concluye que es probable que la frecuencia y la intensidad de los eventos de precipitaciones intensas hayan aumentado en varias áreas, entre ellas América del Norte y Europa, y proyecta que los eventos de precipitaciones intensas en la mayor parte de las latitudes medias las masas terrestres y sobre las regiones tropicales húmedas serán más intensas y frecuentes a finales de este siglo. Estos cambios son importantes para una serie de impactos potenciales, incluidas las inundaciones. En los últimos años se han podido observar numerosos episodios en los que el equivalente a la precipitación de un mes, o incluso de muchos meses, ha caído en cuestión de horas o días, provocando inundaciones devastadoras y mortíferas, como por ejemplo en África, Asia, Europa y América del Norte y del Sur (OMM, 2022). La mayoría de los estudios enfocados en comprender y tratar de predecir los patrones relacionados con eventos extremos de precipitación señalan al cambio climático como la principal causa. De acuerdo al IPCC, para atribuir formalmente la participación del hombre a los eventos extremos, debe observarse una relación entre el incremento de la probabilidad de ocurrencia de los eventos extremos o la amplificación de sus impactos bajo forzantes humanos y, a su vez, no deben ser consistentes con explicaciones alternativas plausibles (Harris et al., 2020). Según la OMM (2022) el cambio climático también se manifiesta en el ciclo del agua: una atmósfera más cálida contiene más humedad. Por ello, la frecuencia y la intensidad de las lluvias fuertes han aumentado desde la década de 1950 y todo apunta a que esa tendencia se mantendrá. Según el IPCC, se prevé que las precipitaciones diarias extremas se intensifiquen en un 7 % por cada grado centígrado de calentamiento global. Sin embargo, a pesar de los avances tecnológicos y en el monitoreo, el

análisis de estos eventos se encuentra limitado por la calidad de datos disponibles y por las escalas de medición. Adicionalmente, dado que son eventos no esperados tienen el potencial de impactar negativamente la sociedad, por lo que se requiere conocer su ocurrencia y tendencia para evaluar la vulnerabilidad a escala local y desarrollar estrategias de adaptación (IPCC, 2012).

En el caso de México los eventos extremos de precipitación han sido considerablemente estudiados. Magaña et al. (2003) señalan la orografía y los vientos del este como determinantes en la intensidad de los eventos extremos en la cuenca de México; también se ha identificado el rol de los ciclones tropicales y las ondas del este en la generación de eventos extremos de precipitación en regiones localizadas a lo largo del Golfo de México y el océano Pacífico (Herrera et al., 2018; Ochoa et al., 2014; Pérez-Morga et al., 2013). Otras investigaciones se han enfocado en el análisis de los impactos relacionados con fenómenos como El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y el monzón de Norteamérica en la variabilidad de los eventos extremos de lluvia en el país (Cavazos et al., 2008; Cavazos y Rivas, 2004). Recientemente, procesos meteorológicos como la convección profunda y húmeda también han sido asociados con la generación de eventos extremos de precipitación (Farfán et al., 2021; León-Cruz et al., 2021).

Con base en lo anterior y en la revisión realizada se pueden identificar varios desafíos y problemas asociados a la predicción de eventos extremos de precipitación. Algunos de ellos son:

- **Complejidad de los sistemas atmosféricos:** Los eventos extremos de precipitación son el resultado de interacciones complejas entre diferentes variables atmosféricas, como la temperatura, la humedad, la presión y los patrones de viento. La comprensión de estas interacciones y la predicción precisa de su comportamiento son desafiantes debido a la complejidad inherente de los sistemas atmosféricos.
- **Escala temporal y espacial:** Los eventos extremos de precipitación pueden ocurrir en escalas temporales y espaciales muy pequeñas y localizadas. La capacidad de los modelos y sistemas de predicción para capturar y representar estos eventos en diferentes escalas puede ser limitada.

- **Disponibilidad y calidad de los datos:** La precisión de las predicciones depende en gran medida de la disponibilidad y calidad de los datos utilizados en los modelos. La falta de datos históricos completos y confiables, especialmente en áreas con una cobertura limitada de estaciones meteorológicas, puede dificultar la precisión de las predicciones.
- **Variabilidad natural:** La variabilidad natural del clima también puede afectar la predicción de eventos extremos de precipitación. Los fenómenos climáticos como El Niño y La Niña pueden tener un impacto significativo en los patrones de precipitación, lo que dificulta la predicción precisa de eventos extremos en determinados períodos.
- **Cambio climático:** El cambio climático introduce un factor adicional de incertidumbre en la predicción de eventos extremos de precipitación. Los modelos climáticos utilizados para predecir el clima futuro están sujetos a ciertas limitaciones y suposiciones, lo que dificulta la determinación exacta de cómo cambiarán los patrones de precipitación en el futuro.

Es importante tener en cuenta que la magnitud de los cambios en los eventos extremos de precipitación puede variar según la región y el escenario de emisiones futuras. Sin embargo, múltiples estudios científicos respaldan la idea de que el cambio climático contribuirá a un aumento en la frecuencia de eventos de precipitación extrema en muchas partes del mundo. Estas proyecciones resaltan la importancia de tomar medidas para adaptarse y mitigar los impactos de estos eventos en el futuro.

2.3. Modelo hidráulico IBER[®]

Iber es un modelo matemático bidimensional para la simulación del flujo en ríos y estuarios desarrollado a partir de la colaboración del Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (*Universidade da Coruña*), del Grupo de Ingeniería Matemática (*Universidade de Santiago de Compostela*), del Instituto Flumen (*Universitat Politècnica de Catalunya* y Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria) y promovido por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (Bladé et al., 2014). Algunos de los campos de aplicación de la versión actual de Iber son:

- Simulación del flujo en lámina libre en cauces naturales.
- Evaluación de zonas inundables.
- Cálculo de las zonas de flujo preferente.
- Cálculo hidráulico de encauzamientos.
- Cálculo hidráulico de redes de canales en lámina libre.
- Cálculo de corrientes de marea en estuarios.
- Estabilidad de los sedimentos del lecho.
- Procesos de erosión y sedimentación por transporte de material granular.

Según Bladé et al. (2014), Iber se desarrolló a partir de 2 herramientas de modelización numérica bidimensional ya existentes, Turbillón y CARPA (cuya metodología se puede encontrar por ejemplo en Cea et al. (2014) y Bladé et al. (2014), respectivamente), ambas con el método de volúmenes finitos, que fueron integradas en un único código ampliado con nuevas capacidades. El modelo Iber consta de diferentes módulos de cálculo acoplados entre sí. En su primera versión se incluye un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos, de granulometría uniforme, por carga de fondo y por carga en suspensión. En sucesivas versiones del modelo se irán complementando y ampliando estos módulos y se desarrollarán otros nuevos. Entre las líneas prioritarias de desarrollo de Iber a corto plazo se encuentran los modelos de transporte de mezclas de sedimento, los modelos de hábitat fluvial y los modelos de calidad de aguas. Iber es un modelo de uso libre que se puede descargar de la página web www.iberaula.es, donde se ofrece documentación adicional, soporte a través de un foro de discusión y cursos de formación.

El módulo hidrodinámico de Iber resuelve las ecuaciones de St. Venant bidimensionales, incorporando los efectos de la turbulencia y rozamiento superficial por viento (Bladé et al., 2014):

$$\begin{aligned}
\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} &= 0 \\
\frac{\partial}{\partial t} (h U_x) + \frac{\partial}{\partial x} \left(h U_x^2 + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (h U_x U_y) &= -g h \frac{\partial Z_b}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t h \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) \\
+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t h \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) & \\
\frac{\partial}{\partial t} (h U_y) + \frac{\partial}{\partial x} (h U_x U_y) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h U_y^2 + g \frac{h^2}{2} \right) &= -g h \frac{\partial Z_b}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t h \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) + \\
\frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t h \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) &
\end{aligned} \tag{Ec. 1}$$

en donde h es el calado, U_x , U_y son las velocidades horizontales promediadas en profundidad, g es la aceleración de la gravedad, ρ es la densidad del agua, Z_b es la cota del fondo, τ_s es la fricción en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento, τ_b es la fricción debida al rozamiento del fondo y ν_t es la viscosidad turbulenta.

2.4. Modelo HEC-HMS

El modelo *Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System* con sus siglas (HEC-HMS), es un modelo lluvia-escorrentamiento desarrollado por el *Hydrologic Engineering Center* del *U.S. Army Corps of Engineers USAFACE* (López et al., 2012), el cual está diseñado para simular el hidrograma de escorrentía que se produce en una red fluvial como consecuencia de un episodio de lluvia. El modelo HEC-HMS es de amplia utilización debido a su versatilidad para caracterizaciones hidrológicas de avenidas y se aplicará en este trabajo el HEC-HMS 4.9, ya que es un programa computacional gratuito. En el HEC-HMS los componentes del modelo funcionan basados en relaciones matemáticas simples que tratan de representar los procesos que intervienen en la generación y circulación de los hidrogramas de escorrentía, por ejemplo, pérdidas, transformación del exceso de lluvia en caudal de salida de la cuenca, adición del flujo base y circulación del hidrograma por el cauce. El punto de partida, por lo tanto, es la representación distribuida de la cuenca basada en una red ramificada de sistemas hidrológicos-hidráulicos (subcuencas-embalses) conectados por sistemas hidráulicos (cauces). Según López et al. (2012) cada sistema se caracteriza fundamentalmente por dos elementos: una serie de parámetros que especifiquen las características particulares del mismo, y unas relaciones matemáticas que rigen su comportamiento.

La entrada al modelo es la precipitación evaluada para cada subcuenca, que se hace mediante el método de los Polígonos de Thiessen (Chow et al., 1989), a partir de los registros de precipitación de las estaciones pluviométricas con influencia en cada subcuenca. Por lo tanto, los valores de precipitación del hietograma en cada subcuenca, P_{sb} , y para cada intervalo de tiempo, i , que se suponen uniformes en toda la superficie de cada subcuenca, se determinan como una media ponderada de las precipitaciones, P_{em} , de las distintas estaciones meteorológicas, j , con influencia en la subcuenca (Ec. 2).

$$P_{sb}(i) = \frac{\sum_{j=1}^n P_{em}(i,j) w(j)}{\sum_{j=1}^n w(j)} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde $P_{sb}(i)$ es la precipitación media uniforme sobre una subcuenca en el intervalo i , $P_{em}(i,j)$ es la precipitación registrada en el intervalo i y estación j , $w(j)$ es el área de influencia de la estación j en la subcuenca, n es el número de estaciones meteorológicas con influencia en la subcuenca.

En el caso de la escorrentía generada a partir de la lluvia efectiva se hace referencia a la generación del hidrograma en el punto de drenaje de una cuenca como consecuencia de la circulación de la lluvia efectiva a través de toda la superficie de la cuenca, componente que representa la escorrentía superficial directa. HEC-HMS, al igual que para los demás componentes del modelo, dispone de diferentes métodos para determinar este hidrograma de escorrentía directa. En este trabajo se ha seleccionado la técnica del hidrograma unitario HU y, dentro de ésta, se ha elegido el HU Adimensional del SCS por ser un método sencillo ampliamente aplicado en multitud de casos. Este HU se desarrolló en el SCS, en la década de los 50, también en base a observaciones de numerosas cuencas agrícolas repartidas a lo largo de toda la geografía de los EE.UU. Las variables están adimensionalizadas, haciendo el mismo de ámbito universal, de forma que el caudal se representa como q/Q_p , siendo Q_p el caudal máximo o punta generado en la cuenca objeto de estudio; y el tiempo como t/T_p , donde T_p es el tiempo para el caudal máximo. Esta metodología establece que (Chow et al., 1989):

$$Q_p = \frac{2.08A}{T_p} \quad \text{Ec. 3}$$

donde Q_p es el caudal punta en m^3/s por cm de lluvia efectiva; A es la superficie de la cuenca en km^2 ; y T_p es el tiempo al máximo en horas.

2.5. Análisis de frecuencias

El análisis de frecuencias es una técnica estadística utilizada para estudiar y comprender la frecuencia de ocurrencia de un evento o fenómeno en particular. Se aplica en diversos campos, como la hidrología, la climatología, la ingeniería civil y la gestión de riesgos naturales. En el contexto de eventos extremos de precipitación, el análisis de frecuencias se utiliza para analizar y modelar la distribución estadística de los valores máximos de precipitación observados o proyectados. Permite determinar la probabilidad de que ocurran eventos de diferentes magnitudes en un determinado período de tiempo, lo que proporciona información valiosa para la evaluación de riesgos y la toma de decisiones. El análisis de frecuencias se basa en la recopilación de datos históricos de precipitación, donde se registran los valores máximos observados en un período de tiempo determinado. Estos datos se utilizan para ajustar diferentes modelos estadísticos, como, por ejemplo: la distribución de Gumbel, la distribución de Pearson tipo III o la distribución de valores extremos de tipo I o II. Estos modelos se utilizan para estimar la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos de precipitación con diferentes períodos de retorno (por ejemplo, eventos que se esperan que ocurran una vez cada 10, 50 o 100 años). El análisis de frecuencias es un procedimiento probabilístico que consta de los cinco pasos siguientes: (1) verificación de la calidad estadística de los datos o muestra disponible; (2) selección de una *función de distribución de probabilidades* (FDP) o modelo probabilístico del cual es probable que procedan los datos; (3) estimación de los parámetros de ajuste de la FDP; (4) cálculo de las predicciones o valores asociados con cierta probabilidad de no excedencia y que se realiza con base en la FDP probada, y (5) selección de resultados, donde se busca de manera *objetiva* el mejor ajuste logrado con cada FDP y método de estimación de sus parámetros (Kite, 1977; Stedinger,

Vogel, & Foufoula-Georgiou, 1993; Rao & Hamed, 2000; Meylan, Favre & Musy, 2012; Salas, Obeysekera & Vogel, 2018).

Capítulo 3

3. Metodología

La metodología diseñada para realizar la presente investigación acopla el modelo hidráulico IBER[®], el método de análisis de frecuencias y el modelo hidrológico HEC-HMS (Figura 5). El IBER[®] se ha usado para el modelo hidráulico bidimensional del flujo en el área de estudio. Se ha decidido emplear el modelo IBER[®] porque es una herramienta eficaz y confiable para el estudio de fenómenos hidráulicos y el análisis de inundaciones. Algunas de las ventajas del modelo IBER[®] son: precisión y robustez, capacidad para simular eventos extremos, modelado de las interacciones entre ríos y llanuras de inundación, flexibilidad y adaptabilidad a diferentes condiciones geográficas y climáticas, interfaz amigable y de acceso libre.

En esta investigación, se ha propuesto la implementación del análisis de frecuencias como método para proyectar las frecuencias en diferentes períodos de retorno y con ello, evaluar la susceptibilidad de la zona de estudios a las inundaciones fluviales ante los potenciales eventos extremos. Con la finalidad de una mayor robustez en las proyecciones a través del análisis de frecuencia se ha decidido aplicar dicho análisis con parámetros estacionarios y también con parámetros no estacionarios. El análisis de frecuencias estacionario se basa en la suposición de que las características estadísticas de los datos se mantienen constantes a lo largo del tiempo. En este enfoque, se considera que la serie de datos utilizada para el análisis representa una muestra aleatoria de un proceso estacionario. Se utilizan métodos estadísticos clásicos para ajustar modelos a los datos y estimar las frecuencias de eventos extremos en diferentes períodos de retorno. Por otro lado, el análisis de frecuencias no estacionario tiene en cuenta la posibilidad de que las características estadísticas de los datos varíen a lo largo del tiempo. En este enfoque, se reconoce que los procesos climáticos y los eventos extremos

pueden estar sujetos a cambios y tendencias a largo plazo. Finalmente, para realizar el análisis de frecuencias se han usado los softwares AX+B, Rstudio con el modelo GAMLSS.

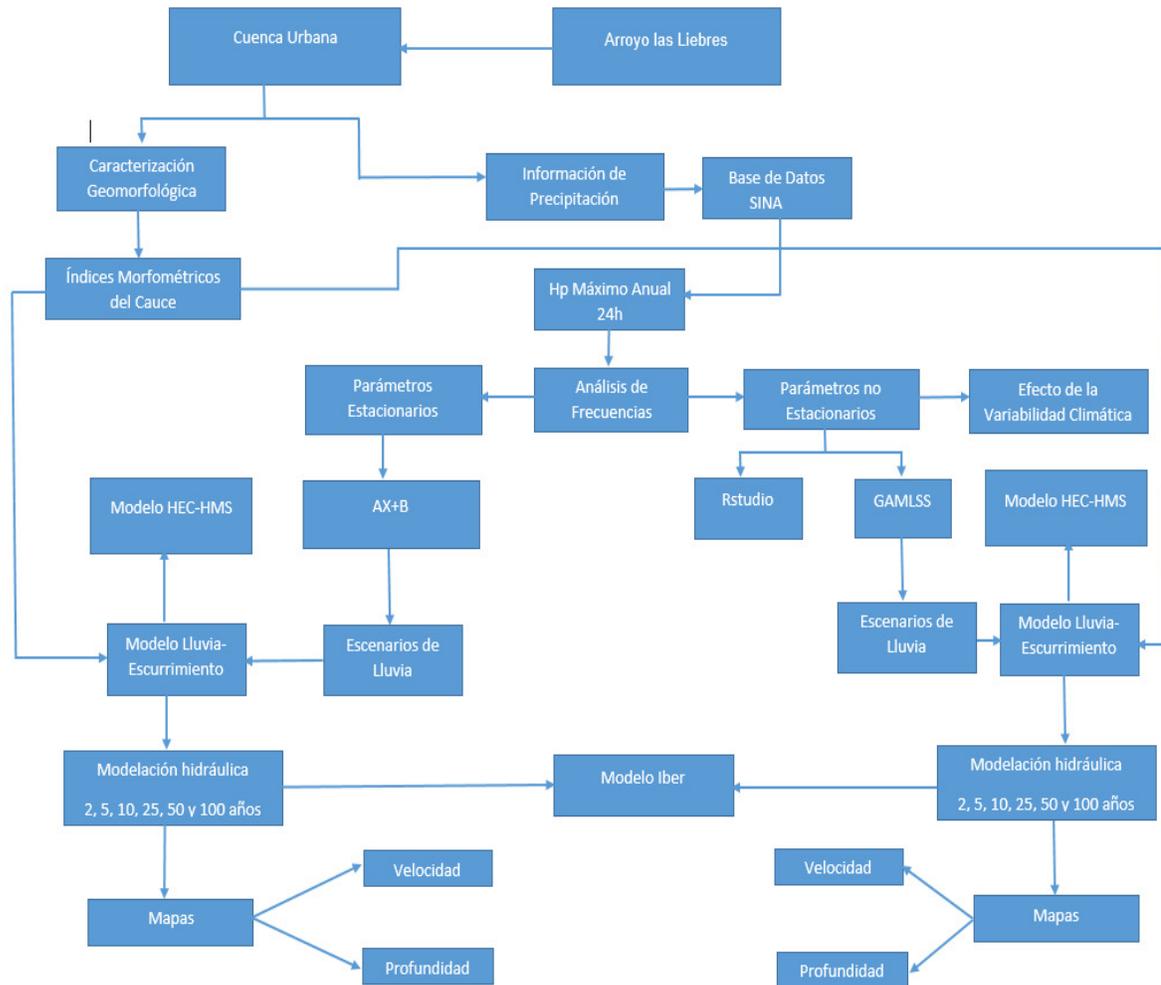


Figura 5. Esquema de la metodología diseñado para realizar la presente investigación.

Dado que no se dispone de estaciones hidrométricas en la zona de estudio, en esta investigación se llevó a cabo un análisis de frecuencias de eventos extremos de precipitación utilizando datos obtenidos de estaciones climatológicas. Para la conversión a escurrimiento superficial, se ha planteado utilizar el modelo hidrológico HEC-HMS. El modelo HEC-HMS permite realizar análisis hidrológicos y simular el comportamiento de las cuencas hidrográficas con escasa información hidrometeorológica. Ayuda a comprender y predecir la respuesta de una cuenca ante la precipitación y otros factores hidrológicos, lo que es

fundamental para la toma de decisiones en la gestión de recursos hídricos y la planificación de infraestructuras hidráulicas. Se ha decidido usar el HEC-HMS al poder utilizarse diferentes métodos para generar tormentas de diseño. Estos métodos pueden incluir modelos estadísticos basados en registros históricos de precipitación, métodos sintéticos que generan tormentas de diseño basadas en características climáticas regionales, o métodos basados en patrones de tormentas de diseño predefinidos. Estas tormentas se usarán para tener en cuenta la duración, la intensidad y la distribución temporal de la precipitación a una escala diferente a la diaria que para estudios de inundación no es aceptable.

Finalmente, la metodología considera una serie de procesos que deberán realizarse en QGIS® para el análisis y evaluación de las velocidades, niveles de agua y áreas de inundación correspondientes a los eventos extremos de diferentes períodos de retorno que se desean evaluar.

3.1. Caso de estudio

El área de estudio seleccionada en el presente proyecto de investigación es el arroyo Las Liebres ubicado en el municipio de León en el estado de Guanajuato. El arroyo Las Liebres abarca gran parte de la zona norte y sur del municipio, al norte colinda con el Sauz y al sur con el boulevard Timoteo Lozano antes de su unión al arroyo el Granizo (Figura). Se ha seleccionado como caso de estudio debido a que a lo largo de los años, este arroyo ha experimentado inundaciones recurrentes que han afectado a las áreas urbanas cercanas (Figura). Además de que los efectos de estas inundaciones han sido poco estudiados para una gestión integral del agua e implementar medidas de prevención y mitigación. Estas medidas pueden incluir la construcción de infraestructuras de drenaje adecuadas, la implementación de planes de gestión del riesgo de inundaciones, la creación de áreas verdes y zonas de amortiguamiento, así como la educación y concienciación de la población sobre las medidas de seguridad durante las inundaciones. Asimismo, no se conoce con precisión la causa exacta de las inundaciones en el arroyo Las Libres de León. Se han identificado varios posibles factores que podrían contribuir a estas inundaciones, incluyendo: lluvias intensas, la falta de mantenimiento adecuado del arroyo, la urbanización no planificada y la obstrucción del flujo debido a la acumulación de sedimentos, basura u otros obstáculos.

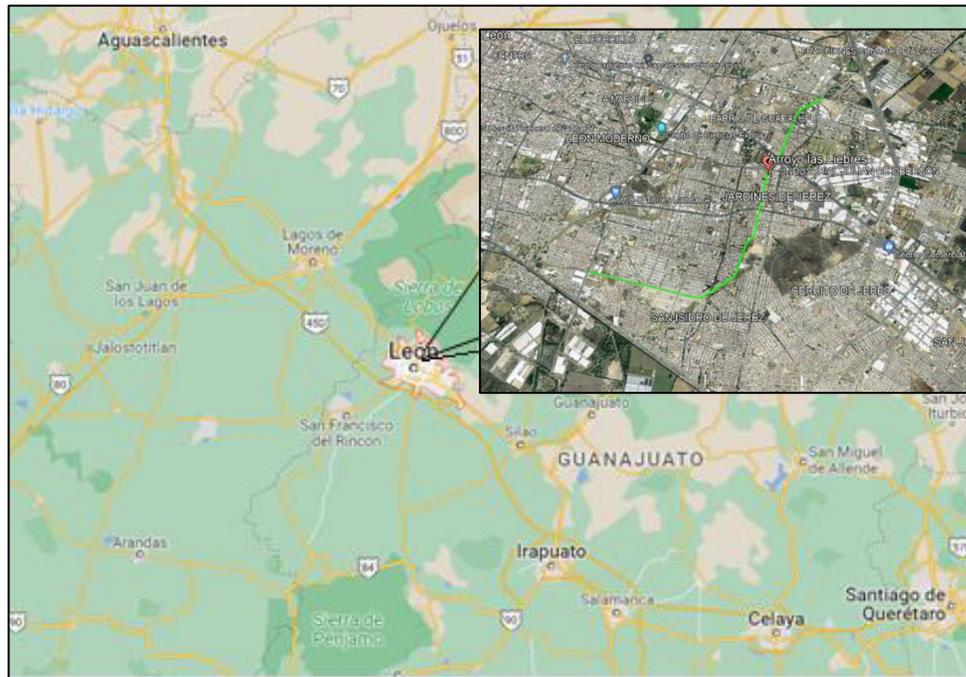


Figura 6. Ubicación del área de estudio (Fuente: Google Maps).



Figura 7. Inundaciones generadas por el desbordamiento del arroyo Las Libres (Fuente: periódico Correo y el Son de León).

3.2. Caracterización morfométrica del área de estudio

Para llevar a cabo la caracterización de la zona de estudio, se realizó la recolección de la información geográfica y climatológica. Además, se recopiló información geográfica en formato vectorial y formato ráster, la cual, se manipuló en el software de sistema de información geográfica QGIS®. En cuanto a la información tipo ráster, se tomó la información del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM), el cual se encuentra libre para su descarga en el sitio web del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el cual tiene una resolución espacial de 30 metros y una resolución vertical al metro (Figura 8; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

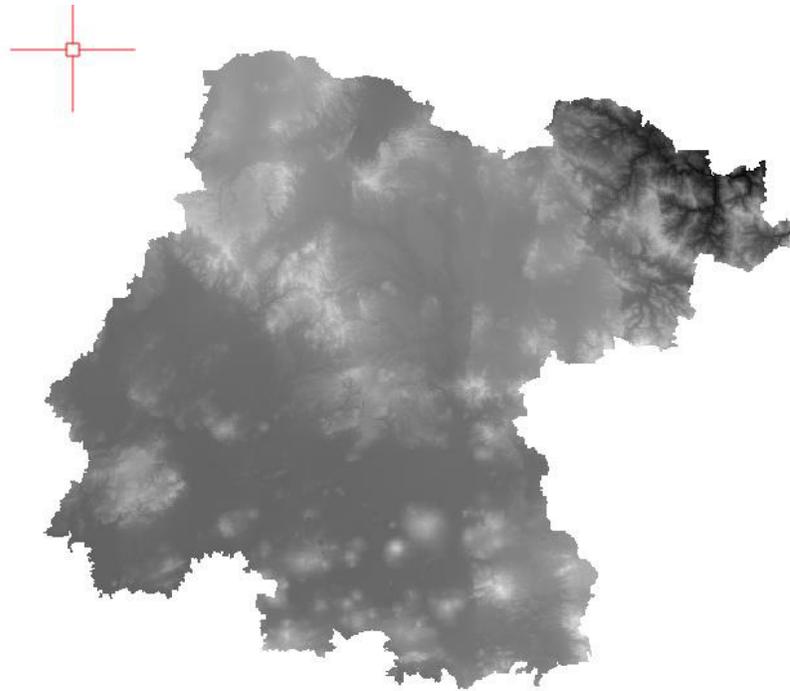


Figura 8. Modelo Digital de Elevaciones con tamaño de celda de 90x90 metros.

3.2.1. Área de la cuenca

Una vez obtenido el modelo digital de elevación, se definió el parteaguas de la cuenca de aportación del arroyo las liebres a la salida del arroyo, el cual está definido por las

coordenadas cartesianas: Longitud -101,665388 y Latitud 21,08835. En la Figura **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra el parteaguas para la cuenca del arroyo las liebres, para su definición se utilizaron herramientas del sistema de información geográfica QGIS®. El área de aportación al arroyo Las Liebres es de 54.22 km² y un perímetro de 59.24 km.

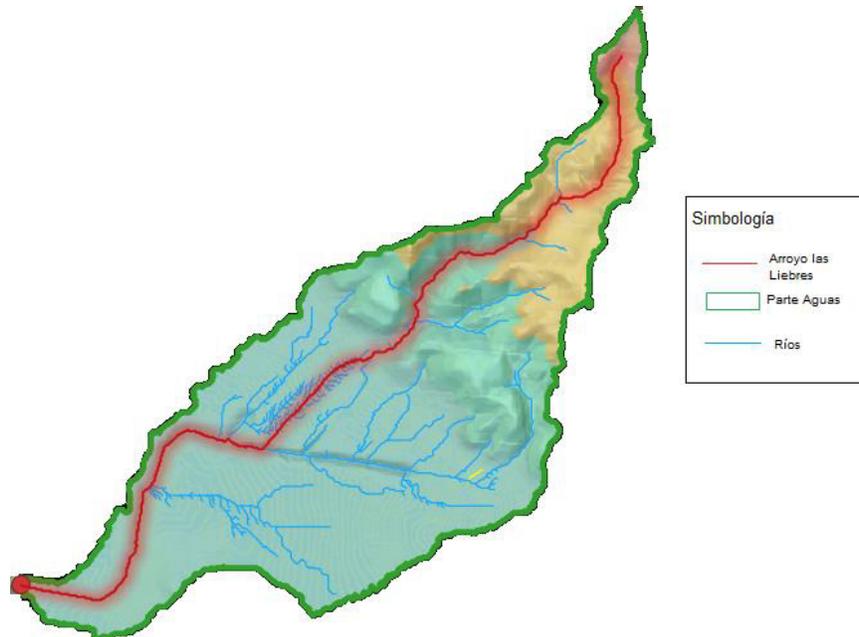


Figura 9. Cuenca de estudio y su red hídrica.

3.2.2. Longitud y pendiente del cauce principal

El cauce principal es la corriente de mayor longitud dentro de la cuenca o subcuenca. La pendiente del cauce principal nos da a entender el grado de respuesta de una cuenca a una tormenta. La pendiente del cauce principal se determinó con la ecuación 4, la cual realiza una diferencia de cotas del cauce principal dividido entre la longitud del cauce principal.

$$S = \frac{C_{max} - C_{min}}{L} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde C_{max} es la cota máxima, C_{min} es la cota mínima y L la longitud del cauce principal. Los resultados se presentan en la Tabla

Tabla 2. Presenta la longitud y la pendiente del cauce principal.

Cuenca	Longitud del cauce principal (km)	Elevación de la corriente (msnm)		Pendiente (%)
		C. máx.	C. min.	
Sitio de estudio	20.63	2848	1737	5.37

3.2.3. Tiempo de concentración

El tiempo de concentración es el lapso entre que cesa la precipitación y el instante en que termina el escurrimiento superficial (Fuentes, 2004). El tiempo de concentración se calculó utilizando el método de California Culvert Practice (1995) que emplea la ecuación 5. La cual considera en el cálculo la diferencia entre la cota mayor y la cota menor de la cuenca (H) y la longitud del cauce principal (L).

$$T_c = \left[0.87 \left(\frac{L^3}{H} \right) \right]^{0.385} \quad \text{Ec. 5}$$

El cálculo del tiempo de concentración es fundamental en el diseño hidrológico y el análisis de eventos de lluvia para determinar los volúmenes y las tasas de escorrentía. Cuanto más corto sea el tiempo de concentración, mayor será la velocidad de escurrimiento y mayor será el riesgo de inundaciones. El tiempo de concentración estimado para la cuenca al sitio de estudio resultó de 2.106 horas.

3.2.4. Pendiente media de la cuenca

El cálculo de la pendiente media de la cuenca de estudio se llevó a cabo con base en la ecuación 4 pero para este caso con la altitud mayor y menor del cauce (ecuación 6). En donde Amac es la altitud mayor del cauce, Amec es la altitud menor del cauce y L es longitud del cauce principal. En la Tabla se muestran los datos calculados.

$$Sc = \frac{Amac - Amec}{L} \quad \text{Ec. 6}$$

Tabla 3. Longitud y pendiente media de la cuenca.

Cuenca	Longitud del cauce principal (km)	Altura del cauce (msnm)		Pendiente (%)
		Amac	Amec	
Sitio de estudio	20.63	2431	1788	3.11

3.2.5. Curva hipsométrica de la cuenca

La curva hipsométrica la calculamos a partir de los datos arrojados de área y elevación del Modelo Digital de Elevaciones (DEM) en QGIS®. En la Figura 10, se presenta el resultado obtenido de la curva hipsométrica para la cuenca. Como se puede observar un porcentaje se tiene en la cuenca un reducido porcentaje de altas elevaciones. Por el contrario, muestra un alto porcentaje de elevaciones bajas lo que indica la presencia de llanuras o áreas bajas propensas a inundaciones.

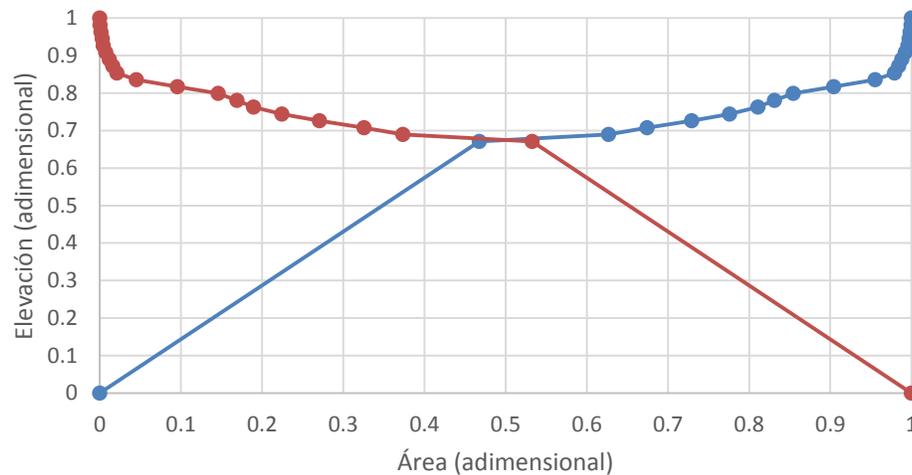


Figura 10. Curva hipsométrica de la cuenca de aportación al arroyo Las Liebres.

3.2.6. Información climatológica

A partir de la capa vectorial de estaciones climatológicas obtenida del Sistema Nacional de Información del agua de la Comisión Nacional del Agua (SINA-CONAGUA), la cual está disponible para su descarga en el siguiente enlace (<http://www.conagua.gob.mx/sina/>), se realizó un primer análisis para identificar las estaciones climatológicas cercanas a la cuenca de estudio. Para esta selección, se consideraron únicamente aquellas estaciones que tuvieran un registro continuo de al menos 30 años. Esta selección se realizó con el objeto de contar con información que permitiera realizar un análisis estadísticamente robusto. En la Figura 11 se muestra el mapa con los polígonos de Thiessen, los cuales permiten identificar aquellas estaciones que tienen influencia en la cuenca. Se identificó una estación con influencia la cual es: LEON (clave: 11095), debido a que contaba con más de 30 años de registros continuos.

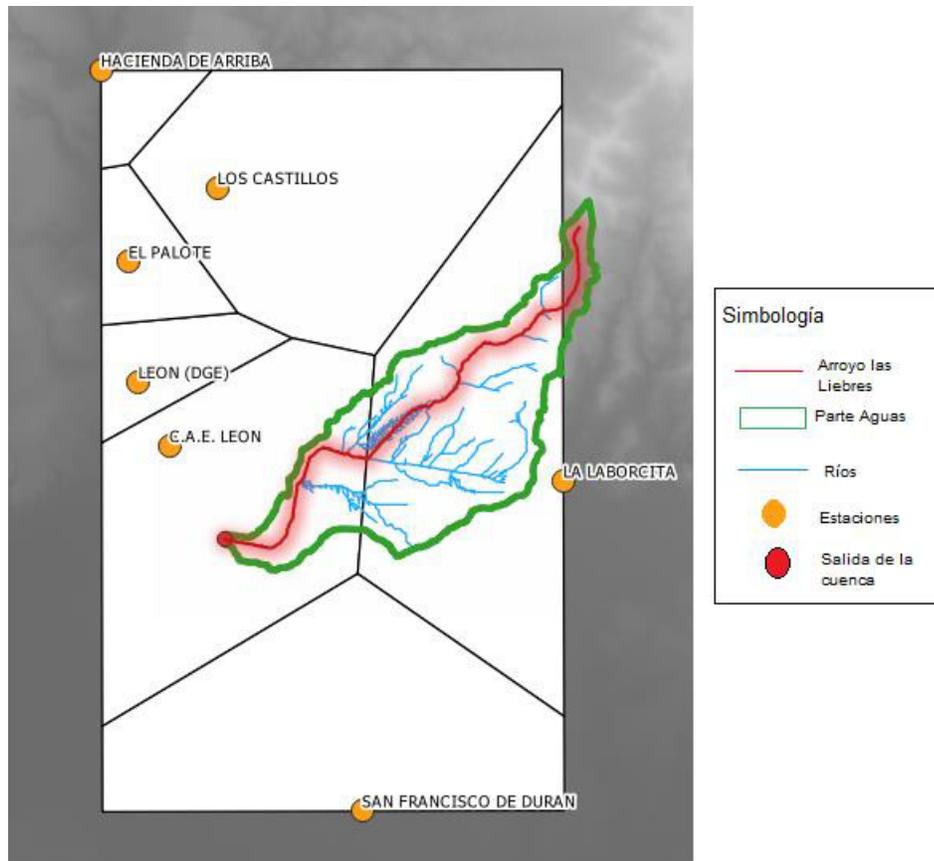


Figura 11. Ubicación de las estaciones climatológicas y polígonos de Thiessen.

Una vez identificada la estación a utilizar en el estudio, la información fue consultada en la base de datos del Sistema Meteorológico Nacional de la CONAGUA (SMN-CONAGUA) de donde se descargaron los datos diarios de precipitación y temperatura.

3.3.7. Precipitaciones máximas en 24 horas

En esta etapa de la metodología se identificaron las precipitaciones máximas anuales en 24 horas para cada año en la estación climatológica con influencia en el área de estudio. En la Tabla se tienen los registros de la estación LEON (clave: 11095). El mes en que se concentra el mayor número de eventos máximos en la cuenca es Julio.

Tabla 4. Precipitaciones anuales en 24 horas, estación LEÓN DGE (11095).

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1960	0	0	0	0	10	2	25	68	21	0	0	0	68
1961	0	0	0	1	6	0	20	17	0	1	5	0	20
1962	0	6	0	4	0	34	6	6	0	18	0	0	34
1963	0	0	0	0	1	0	20	20	0	3	0	0	20
1964	24	0	0	0	0	1	24	20	12	1	0	3	24
1965	0	0	0	0	0	2	0	40	2	0	0	0	40
1966	0	20	4	0	0	27	8	11	0	3	0	0	27
1967	0	0	5	2	15	0	0	11	3	9	3	2	15
1968	0	0	0	1	0	32	4	4	47	1	0	12	47
1969	0	0	0	0	1	16	0	17	0	1	0	0	17
1970	0	0	0	0	0	30	20	14	60	0	0	0	60
1971	0	0	0	0	0	21	16	28	0	1	0	2	28
1972	0	0	0	0	0	3	19	2	18	25	10	0	25
1973	0	0	0	0	32	12	43	30	38	2	0	0	43
1974	0	7	0	0	11	27	26	42	38	0	8	13	42
1975	23	0	0	1	9	15	25	43	0	0	0	3	43
1976	0	0	0	1	4	2	58	1	23	0	6	0	58
1977	0	0	0	4	0	28	2	20	1	0	1	1	28
1978	0	1	0	0	20	8	12	7	21	0	0	0	21
1979	0	6	0	0	0	0	25	0	10	0	0	11	25
1980	22	7	0	0	9	19	15	15	16	15	0	0	22
1981	11	0	0	5	1	15	36	10	11	3	0	11	36
1982	0	1	0	2	13	25	36	10	11	3	8	11	36
1983	14	0	0	0	11	17	36	39	21	0	31	0	39
1984	4	10	0	0	1	19	17	34	6	0	0	0	34
1985	0	0	0	2	6	23	36	20	21	0	0	0	36
1986	0	0	0	1	20	44	53	2	38	33	5	0	53
1987	2	0	0	0	4	31	74	44	15	0	0	0	74
1988	0	0	6	0	0	2	14	45	2	0	0	0	45
1989	0	0	0	1	3	2	0	4	24	0	3	6	24
1990	0	0	0	1	2	14	19	34	65	20	0	0	65
1991	0	5	0	0	0	6	25	25	8	0	0	11	25
1992	14	12	0	3	5	6	19	0	0	20	6	2	20
1993	3	0	0	0	9	24	23	14	77	4	0	0	77
1994	0	0	0	0	3	30	26	28	39	3	0	0	39
1995	1	0	0	0	20	19	60	18	11	3	1	0	60
1996	0	0	0	0	0	15	17	48	42	17	0	0	48
1997	0	0	12	10	14	39	11	21	4	11	0	0	39
1998	0	0	0	0	0	25	20	9	26	53	0	0	53

1999	0	0	1	0	21	37	23	50	20	0	0	0	50
2000	0	0	0	0	31	28	24	49	46	1	2	5	49
2001	0	0	0	11	1	31	70	23	44	16	0	0	70
2002	0	11	0	0	3	35	31	17	4	7	8	0	35
2003	6	1	0	4	4	73	70	43	39	7	0	0	73
2004	4	0	10	0	0	27	37	57	37	18	0	4	57
2005	0	19	7	1	0	0	20	60	5	4	0	0	60
2006	16	0	2	0	8	6	7	49	3	27	0	13	49
2007	10	0	3	0	9	36	6	28	27	0	9	0	36
2008	6	0	0	4	1	8	37	44	44	8	0	0	44
2009	3	0	2	4	7	37	14	8	60	11	0	0	60
2010	19	71	0	2	0	3	82	44	58	0	0	0	82
2011	0	0	0	0	0	25	19	15	9	1	0	0	25
2012	3	8	0	0	2	35	42	12	21	4	0	0	42
2013	2	0	0	0	0	23	24	32	25	22	2	26	32
2014	0	0	0	2	18	22	38	15	8	11	3	0	38
2015	0	2	46	28	30	36	0	3	40	3	0	0	46
2016	8	2	3	0	5	2	27	66	22	0	6	0	66
2017	0	0	15	0	4	70	62	35	46	0	0	0	70
2018	0	16	0	13	8	65	41	40	37	17	26	0	65

Capítulo 4

4. Modelado estocástico e hidrológico

4.1. Estimación de la precipitación de diseño

El periodo de retorno se refiere al tiempo en que probablemente se pueda presentar un evento igual o mayor. Para calcular los gastos que se pueden presentar en la cuenca para diferentes periodos de retorno donde no se cuente con información de aforos, es necesario aplicar modelos de lluvia-escorrentamiento, para lo cual se necesita calcular la precipitación para diferentes periodos de retorno (Tabla 5). Para asignarle el periodo de retorno a los registros, se utiliza la ecuación de Weibull (Ec. 7):

$$Tr = \frac{n + 1}{m} \quad \text{Ec. 7}$$

donde Tr es periodo de retorno, n es el número de registros y m es el orden de los datos cuando los registros se ordenan de mayor a menor. Como se puede observar en la Tabla y la Figura 12 el periodo de retorno con el cual se realizará el análisis de frecuencias es de 60 años con un evento máximo de precipitación de 82 mm.

Tabla 5. Determinación del periodo de retorno.

Año	Precipitación (mm)	Precipitación Ordenada	Número de orden	Periodo de Retorno (años)	Probabilidad (%)
1960	68	82	1	60,0	0,017
1961	20	77	2	30,0	0,033
1962	34	74	3	20,0	0,050
1963	20	73	4	15,0	0,067
1964	24	70	5	12,0	0,083

1965	40	70	6	10,0	0,100
1966	27	68	7	8,6	0,117
1967	15	66	8	7,5	0,133
1968	47	65	9	6,7	0,150
1969	17	65	10	6,0	0,167
1970	60	60	11	5,5	0,183
1971	28	60	12	5,0	0,200
1972	25	60	13	4,6	0,217
1973	43	60	14	4,3	0,233
1974	42	58	15	4,0	0,250
1975	43	57	16	3,8	0,267
1976	58	53	17	3,5	0,283
1977	28	53	18	3,3	0,300
1978	21	50	19	3,2	0,317
1979	25	49	20	3,0	0,333
1980	22	49	21	2,9	0,350
1981	36	48	22	2,7	0,367
1982	36	47	23	2,6	0,383
1983	39	46	24	2,5	0,400
1984	34	45	25	2,4	0,417
1985	36	44	26	2,3	0,433
1986	53	43	27	2,2	0,450
1987	74	43	28	2,1	0,467
1988	45	42	29	2,1	0,483
1989	24	42	30	2,0	0,500
1990	65	40	31	1,9	0,517
1991	25	39	32	1,9	0,533
1992	20	39	33	1,8	0,550
1993	77	39	34	1,8	0,567
1994	39	38	35	1,7	0,583
1995	60	36	36	1,7	0,600
1996	48	36	37	1,6	0,617
1997	39	36	38	1,6	0,633
1998	53	36	39	1,5	0,650
1999	50	35	40	1,5	0,667
2000	49	34	41	1,5	0,683
2001	70	34	42	1,4	0,700

2002	35	32	43	1,4	0,717
2003	73	28	44	1,4	0,733
2004	57	28	45	1,3	0,750
2005	60	27	46	1,3	0,767
2006	49	25	47	1,3	0,783
2007	36	25	48	1,3	0,800
2008	44	25	49	1,2	0,817
2009	60	25	50	1,2	0,833
2010	82	24	51	1,2	0,850
2011	25	24	52	1,2	0,867
2012	42	22	53	1,1	0,883
2013	32	21	54	1,1	0,900
2014	38	20	55	1,1	0,917
2015	46	20	56	1,1	0,933
2016	66	20	57	1,1	0,950
2017	70	17	58	1,0	0,967
2018	65	15	59	1,0	0,983

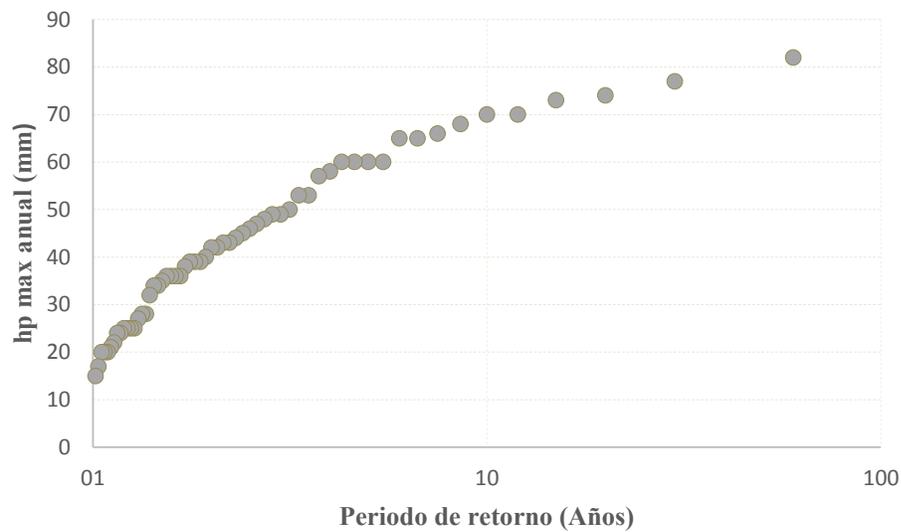


Figura 12. Curva de frecuencia de las precipitaciones máximas anuales en la estación 11095.

4.2. Análisis de frecuencia

El método de análisis de frecuencia en precipitaciones tiene como objetivo estimar la magnitud de un evento para cierto periodo de retorno (T_r). Existen diferentes funciones de distribución de probabilidad para modelar series de tiempo, en este proyecto usaremos funciones de distribución de probabilidad para eventos extremos. Entre las funciones de distribución usadas para un comportamiento típico de eventos hidrológicos extremos, se usan las siguientes:

- Gumbel
- Gumbel Doble (para dos poblaciones)
- Exponencial 2p
- Lognormal III
- Gamma III
- Log Pearson III

En este estudio los métodos que se utilizaron para la estimación de parámetros fueron el método de máxima verosimilitud y el método de momentos, ya que son los más usados debido a su fácil implementación y a su mejor ajuste de los parámetros. Cabe destacar que para que un análisis de frecuencia sea funcional se requiere una serie de tiempo que cuente con al menos 25 años de registros continuos y este estudio lo cumple ya que se cuenta con una serie de datos a partir de enero del 1960 a diciembre del 2018, los cuales equivalen a 59 años de registros aproximadamente. Debido a la tendencia y la auto correlación de los datos observados, migramos a analizar la precipitación desde un parámetro estacionario y no estacionario.

4.2.1. Parámetros estacionarios

El análisis para el modelo estacionario se llevó a cabo con el software Ax+b, el cual es de libre distribución y fue desarrollado por CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres), en el cual se encuentran implementadas las funciones de distribución propuestas para el proyecto. En la *Figura* se muestra el análisis de frecuencias de las precipitaciones máximas anuales de la estación 11095 en la interfaz del software.

Tras aplicar criterios de bondad en el ajuste, se determinó que la distribución que mejor se ajusta a la frecuencia de los datos observados es la Gumbel Doble. Para estimar los parámetros de esta distribución, se utilizó el método de máxima verosimilitud. En la Tabla 6 se muestran los eventos para los diferentes periodos de retorno y en la Figura se aprecian los datos observados y los inferidos con el modelo estadístico ajustado.

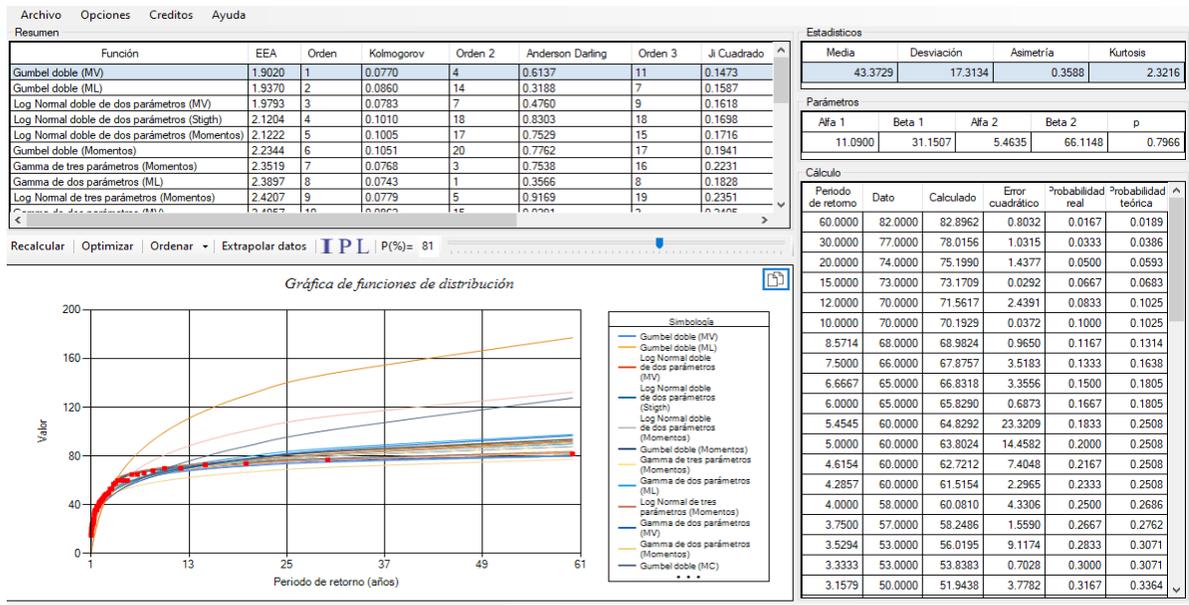


Figura 13. Análisis de frecuencias de las precipitaciones máximas anuales en la estación 11095

Tabla 6. Precipitaciones inferidas con el modelo de mejor ajuste en $Ax+b$.

Tr (años)	Precipitación (mm)
2	42.00
5	63.81
10	70.19
25	76.75
50	81.59
100	86.66

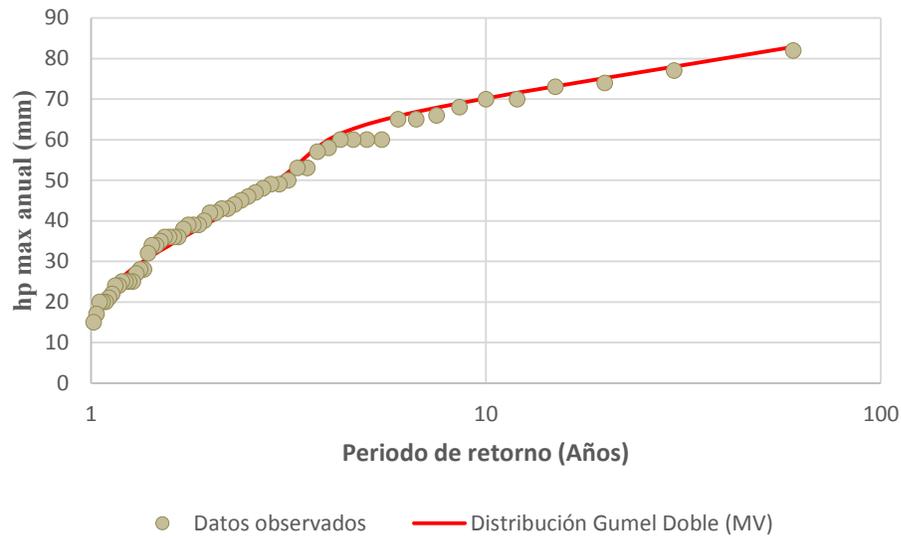


Figura 14. Resultado del análisis de frecuencia para la función de distribución Gumbel Doble.

4.2.2. Parámetros no estacionarios

El análisis para el modelo no estacionario se llevó a cabo con el software Rstudio, el cual es de libre distribución y aplica el modelo estadístico GAMLSS. El cual es un modelo de regresión distributiva univariado, donde todos los parámetros de la distribución asumida para la respuesta se pueden modelar como funciones aditivas de las variables explicativas. En la Tabla y la Figura se presentan los resultados obtenidos en el análisis de frecuencias con parámetros no estacionarios. En la Tabla 8 se presentan los resultados obtenidos con el modelo estadístico GAMLSS.

Tabla 7. Datos inferidos del Rstudio.

2 Tr	5 Tr	10 Tr	25 Tr	50 Tr	100Tr
31.356	42.510	49.252	57.162	62.678	67.916
31.571	42.801	49.589	57.554	63.107	68.381
31.787	43.094	49.929	57.947	63.538	68.849
32.004	43.389	50.270	58.344	63.973	69.320
32.444	43.984	50.961	59.145	64.852	70.272

32.666	44.285	51.309	59.550	65.296	70.753
32.889	44.588	51.661	59.957	65.742	71.237
33.114	44.894	52.014	60.368	66.192	71.724
33.341	45.201	52.370	60.781	66.645	72.215
33.569	45.510	52.728	61.197	67.101	72.709
33.799	45.822	53.089	61.616	67.561	73.207
34.263	46.451	53.818	62.462	68.488	74.212
34.498	46.769	54.187	62.889	68.957	74.720
34.734	47.089	54.557	63.320	69.429	75.231
34.971	47.411	54.931	63.753	69.904	75.746
35.211	47.735	55.307	64.189	70.382	76.264
35.452	48.062	55.685	64.628	70.864	76.786
35.694	48.391	56.066	65.071	71.349	77.312
35.938	48.722	56.450	65.516	71.837	77.841
36.184	49.055	56.836	65.964	72.329	78.373
36.432	49.391	57.225	66.416	72.824	78.910
36.681	49.729	57.617	66.870	73.322	79.450
36.932	50.069	58.011	67.328	73.824	79.993
37.185	50.412	58.408	67.788	74.329	80.541
37.439	50.757	58.808	68.252	74.838	81.092
37.696	51.104	59.210	68.719	75.350	81.647
37.954	51.454	59.615	69.190	75.865	82.206
38.213	51.806	60.023	69.663	76.385	82.768
38.475	52.161	60.434	70.140	76.907	83.335
38.738	52.518	60.847	70.620	77.434	83.905
39.003	52.877	61.264	71.103	77.963	84.479
39.270	53.239	61.683	71.590	78.497	85.057
39.539	53.603	62.105	72.080	79.034	85.639
39.809	53.970	62.530	72.573	79.575	86.225
40.082	54.339	62.958	73.069	80.120	86.815
40.356	54.711	63.389	73.569	80.668	87.409
40.632	55.086	63.823	74.073	81.220	88.008
40.910	55.463	64.259	74.580	81.776	88.610
41.190	55.842	64.699	75.090	82.335	89.216
41.472	56.224	65.142	75.604	82.899	89.827
41.756	56.609	65.588	76.121	83.466	90.441
42.042	56.996	66.037	76.642	84.037	91.060
42.329	57.386	66.488	77.167	84.612	91.683
42.619	57.779	66.943	77.695	85.191	92.311

42.911	58.175	67.402	78.226	85.774	92.943
43.204	58.573	67.863	78.762	86.361	93.579
43.500	58.973	68.327	79.301	86.952	94.219
43.798	59.377	68.795	79.843	87.547	94.864
44.097	59.783	69.266	80.390	88.146	95.513
44.399	60.192	69.740	80.940	88.749	96.166
44.703	60.604	70.217	81.494	89.357	96.825
45.009	61.019	70.697	82.052	89.968	97.487
45.317	61.437	71.181	82.613	90.584	98.154
45.627	61.857	71.668	83.178	91.204	98.826
45.939	62.280	72.159	83.748	91.828	99.502
46.254	62.707	72.652	84.321	92.456	100.183
46.570	63.136	73.150	84.898	93.089	100.869
46.889	63.568	73.650	85.479	93.726	101.559
47.210	64.003	74.154	86.064	94.367	102.254
47.533	64.441	74.662	86.652	95.013	102.954
47.858	64.882	75.172	87.245	95.663	103.658
48.186	65.326	75.687	87.842	96.318	104.367
48.515	65.773	76.205	88.444	96.977	105.082
48.847	66.223	76.726	89.049	97.641	105.801
49.182	66.676	77.251	89.658	98.309	106.525
49.518	67.132	77.780	90.272	98.982	107.254
49.857	67.592	78.312	90.889	99.659	107.988
50.198	68.054	78.848	91.511	100.341	108.727
50.542	68.520	79.388	92.138	101.028	109.471
50.888	68.989	79.931	92.768	101.719	110.220
51.236	69.461	80.478	93.403	102.415	110.974

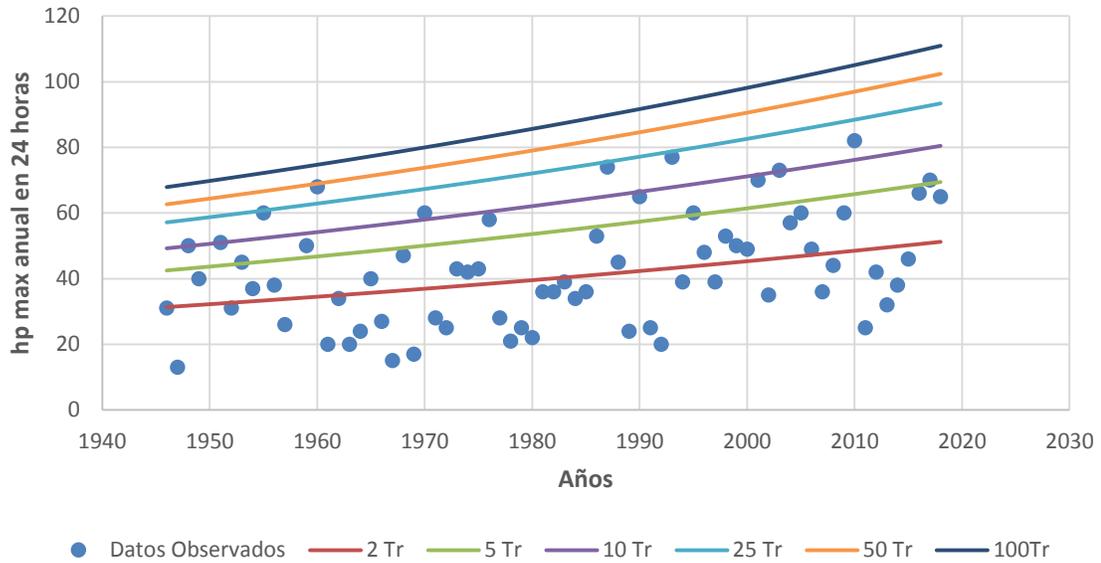


Figura 15. Resultados del análisis de frecuencia de Rstudio.

Tabla 8. Precipitaciones inferidas con el modelo GAMLSS.

Tr (años)	Precipitación (mm)
2	51.236
5	69.461
10	80.478
25	93.403
50	102.415
100	110.974

4.2.3. Tormentas sintéticas

Las tormentas sintéticas, también conocidas como tormentas de diseño, son eventos de precipitación generados artificialmente que se utilizan en la ingeniería hidrológica para estimar y diseñar obras de drenaje, sistemas de alcantarillado, estructuras de control de inundaciones y otros proyectos relacionados con el manejo del agua. Para la determinación

de las tormentas sintéticas se ha tenido en cuenta el tiempo de concentración, el cual es muy importante en los modelos lluvia-escorrentamiento, por ende, se implementaron las fórmulas de Emil Kuishiling y C.E. Gransky, quienes consideraban la duración de la tormenta se asume igual al tiempo de concentración. Este método desarrolla las siguientes ecuaciones:

$$hpd = \frac{K * tc^{1-e}}{(1 - e)} \quad \text{Ec. 8}$$

$$K = \frac{hp(1 - e)}{24^{1-e}} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde hpd es la precipitación en el tiempo de concentración (en mm), tc es el tiempo de concentración (en horas), K es un coeficiente de distribución.

Para el ajuste de distribución de la tormenta a la forma de la curva de máxima intensidad del método sugiere emplear un factor “e”, El cual depende del tiempo de concentración, empleando los valores tomados de la siguiente tabla Tabla 9 del Instructivo de Hidrología de la CONAGUA.

Tabla 9. Factor e para ecuaciones de Emil Kuishiling y C.E. Gransky.

Valor de e	Casos recomendados
De 0.45 a 0.50	Cuencas muy grandes con Tc igual o mayor de 48 horas
De 0.50 a 0.55	Cuencas grandes con Tc mayor de 24 horas y menor de 48 horas
De 0.55 a 0.60	Cuencas medianas con Tc entre 6 y 24 horas
De 0.60 a 0.70	Cuencas chicas con Tc entre 6 y 1 hora
De 0.70 a 0.80	Cuencas muy pequeñas con Tc menor de 1 hora

Para la cuenca del arroyo las liebres el tiempo de concentración se determinó de 2.106 horas, por lo que se asumió un valor del coeficiente e=0.7, el cual proporciona un valor más crítico de la lluvia de diseño. En las Tabla 10 y Tabla 11 se presenta las tormentas sintéticas para los periodos de retorno considerados en la presente investigación.

Tabla 10. Escenario de tormentas para diferentes periodos de retorno del modelo estacionario.

Tr (años)	hp (mm)	K	hpd (mm)
2	42.00	4.86	20.24
5	63.81	7.38	30.75
10	70.19	8.12	33.83
25	76.75	8.87	36.99
50	81.59	9.43	39.32
100	86.66	10.02	41.76

Tabla 11. Escenario de tormentas para diferentes periodos de retorno del modelo no estacionario.

Tr (años)	hp (mm)	K	hpd (mm)
2	51.24	5.92	24.69
5	69.46	8.03	33.47
10	80.48	9.31	38.78
25	93.40	10.80	45.01
50	102.42	11.84	49.36
100	110.97	12.83	53.48

4.5. Modelado hidrológico con HEC-HMS

El modelado hidrológico de las tormentas sintéticas se llevó a cabo con la aplicación del software HEC-HMS. El objetivo de un modelo hidrológico es simular numéricamente los procesos de interés en la cuenca. En este caso lo que interesa es modelar las crecidas generadas por las tormentas sintéticas. Con base en las características morfométricas de la

cuenca, además de haber analizado la precipitación y definido las tormentas para los diferentes periodos de retorno. Para la transformación de lluvia a escurrimiento, se usó el hidrograma unitario adimensional desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) y para el cálculo de las pérdidas HEC-HMS cuenta con diferentes métodos, pero para esta investigación se eligió el método de conservación de suelos del número de curva SCS CN, para estimar las pérdidas en un evento de tormenta (Mockus, 1969). En la Figura 16; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y la Figura 17; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra el modelo de cuenca y las especificaciones de control donde se define el periodo de tiempo durante el cual se realizó la simulación y para nuestro caso el intervalo de tiempo es de 10 min. y los hidrogramas de salidas planteados para los parámetros estacionario y no estacionario en el software HEC-HMS para el evento de un periodo de retorno de 10 años y se consideró obtener las salidas en intervalos de tiempo de 10 minutos.

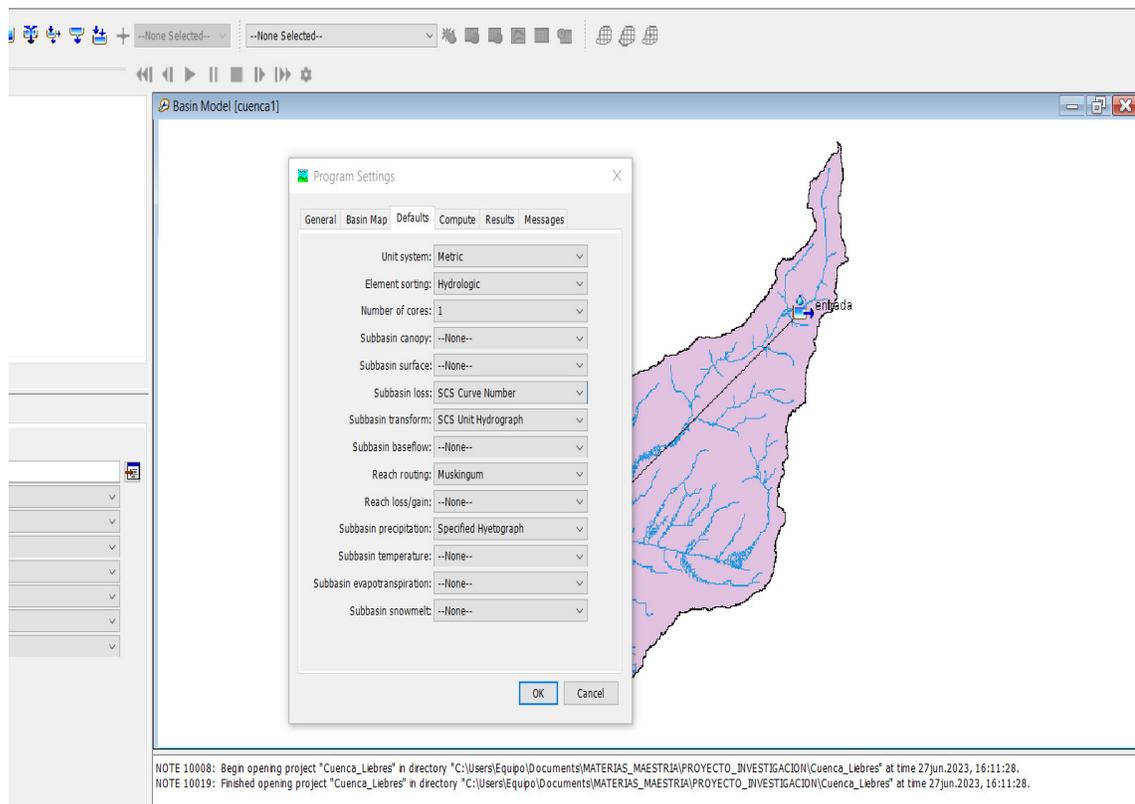


Figura 16. Construcción del modelo hidrológico de la cuenca de aportación al arroyo Las Liebres.

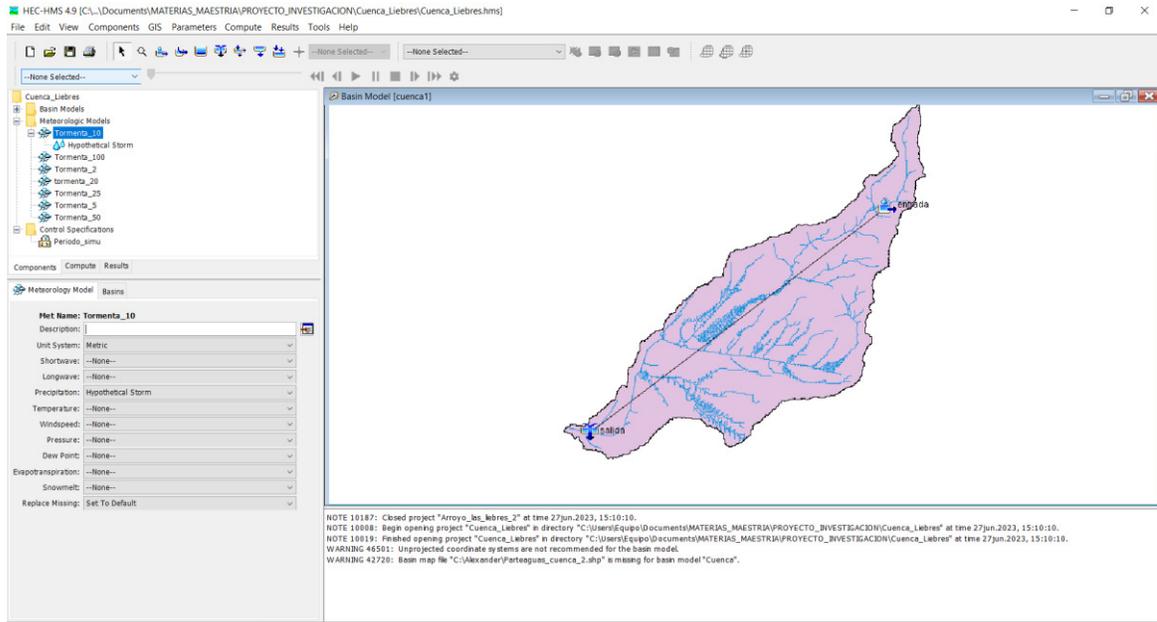


Figura 17. Modelo de cuenca para el arroyo las liebres.

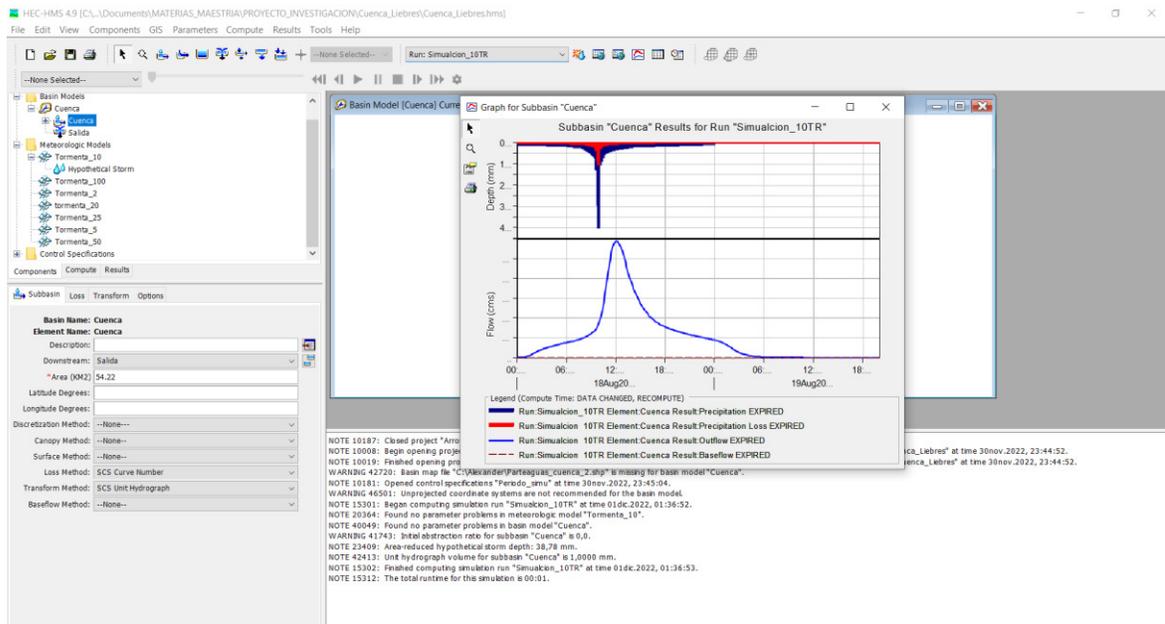


Figura 18. Hidrogramas de crecida en el software HEC-HMS, resultados para el modelo del arroyo las liebres.

La Figura 18 se presenta el resultado del hidrograma de crecida del modelo en el software HEC-HMS para el evento de un periodo de retorno de 10 años. En este estudio se consideró

adecuado el obtener las salidas en intervalos de 10 minutos. En la **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura 19 y la Figura 20 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se tiene el resumen de los resultados de la modelación hidrológica para el modelo estacionario y no estacionario. Los hidrogramas permiten observar que en un evento ciclónico no estacionario el caudal máximo alcanza un valor de caudal pico mayor al que se tendría en un evento con parámetros estacionarios.

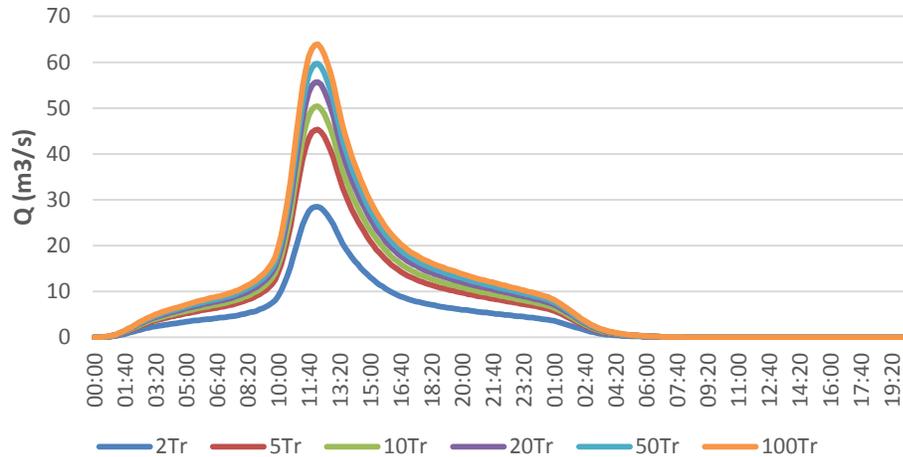


Figura 19. Hidrogramas de las avenidas para el modelo estacionario.

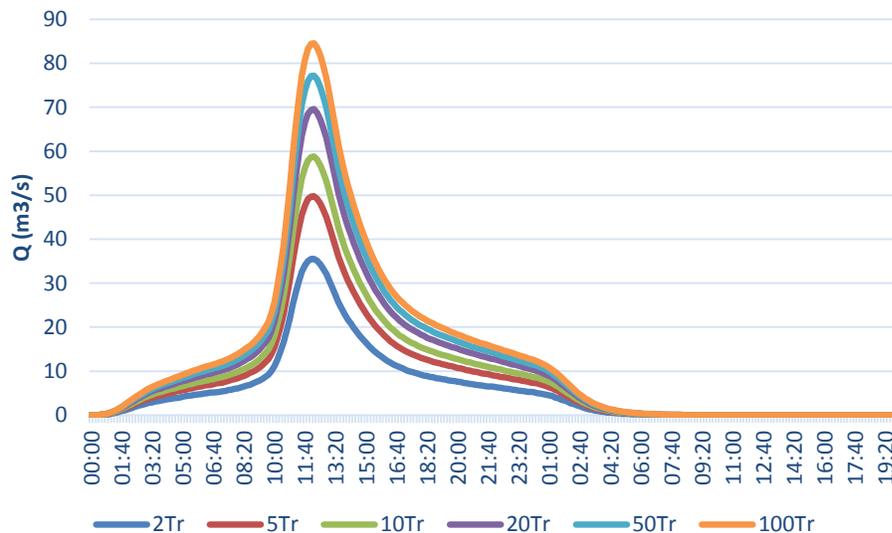


Figura 20. Hidrogramas de las avenidas para el modelo no estacionario

Capítulo 5

5. Modelado hidráulico en IBER®

En la actualidad la modelación del flujo en ríos es abordada utilizando herramientas computacionales. Este tipo de modelos son conocidos como modelos hidráulicos computacionales, dentro de ellos tenemos los modelos unidimensionales, entre los cuales se tienen aquellos que trabajan en régimen permanente gradualmente variado y de fondo fijo, los cuales son de utilidad cuando el problema a abordar es estudiar los efectos del tránsito de una avenida en un río. Este tipo de modelos se basan en esquemas numéricos relativamente sencillos y de gran eficacia, pudiendo considerar cambios de régimen y cauces con geometrías complejas.

En la presente investigación se ha decidido usar en el modelado hidráulico el software IBER®, que es un modelo numérico bidimensional de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen variable, que incorpora como esquema numérico el método de alta resolución de volúmenes finitos. Este modelo consiste en la integración de los modelos CARPA (de la Universidad Politécnica de Catalunya) y TURBILLON (de la Universidad de Coruña). Dentro de su rango de aplicación se encuentran la hidrodinámica fluvial, la simulación de rotura de presas, la evaluación de zonas inundables, el cálculo de transporte de sedimentos y el flujo de marea en estuarios (Bladé et al., 2009). El IBER® consta de 3 módulos de cálculo principales: un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos. Todos los módulos trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares o cuadriláteros. En el módulo hidrodinámico, el cual constituye la base de IBER®, se resuelven las ecuaciones de aguas someras bidimensionales promediadas en profundidad o ecuaciones de Saint Venant (Bladé, 2010).

5.2. Construcción del modelo hidráulico en IBER®

Para definir el modelo numérico y el área de simulación, ha sido necesario obtener información topográfica una escala adecuada. Es por ello, que se utilizó un Modelo Digital del Terreno (con resolución de 15x15m) proporcionado por el Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de León (SAPAL). El cual se generó a partir de un levantamiento topográfico realizado anteriormente en la zona de estudio (Figura 21).

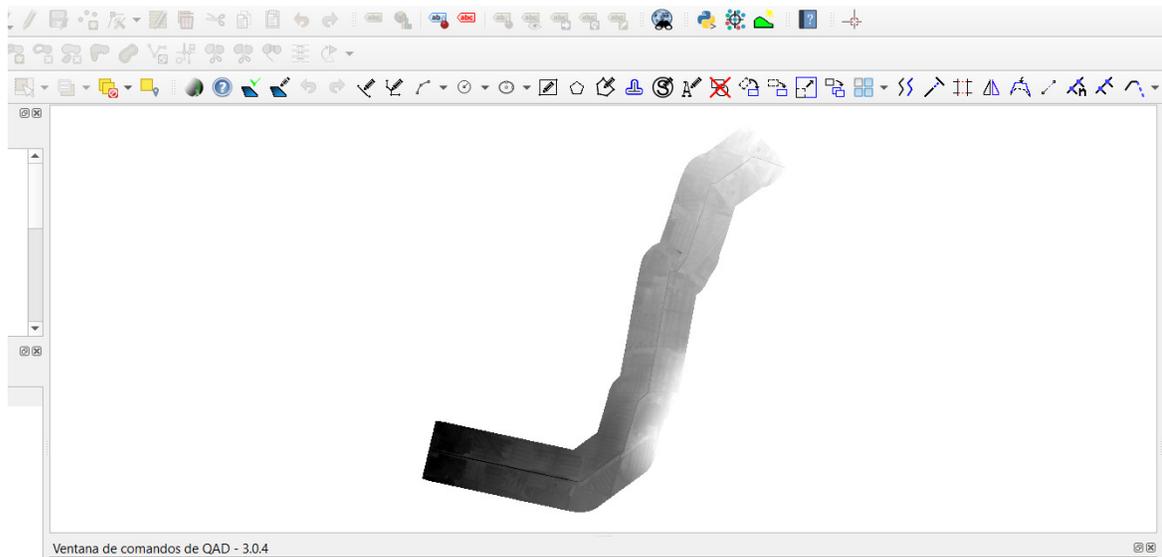


Figura 21. Modelo Digital del Terreno del arroyo Las Liebres.

5.3. Geometría del modelo

La fase inicial en la construcción del modelo numérico en IBER® requiere definir la geometría, la cual requiere de los siguientes aspectos:

- Imagen de fondo georreferenciada
- Superficies de cálculo
- Tipo de malla
- Tamaño de malla

5.3.1. Imagen de fondo

Las imágenes de fondo se obtuvieron a través del software de libre acceso *SASplanet* utilizando la información de satélite *Bing Maps*, los cuales se descargaron en formato ráster con extensión *png* y con una resolución de 15 metros (Figura 22). Las imágenes se procesaron y georreferenciaron en QGIS®.

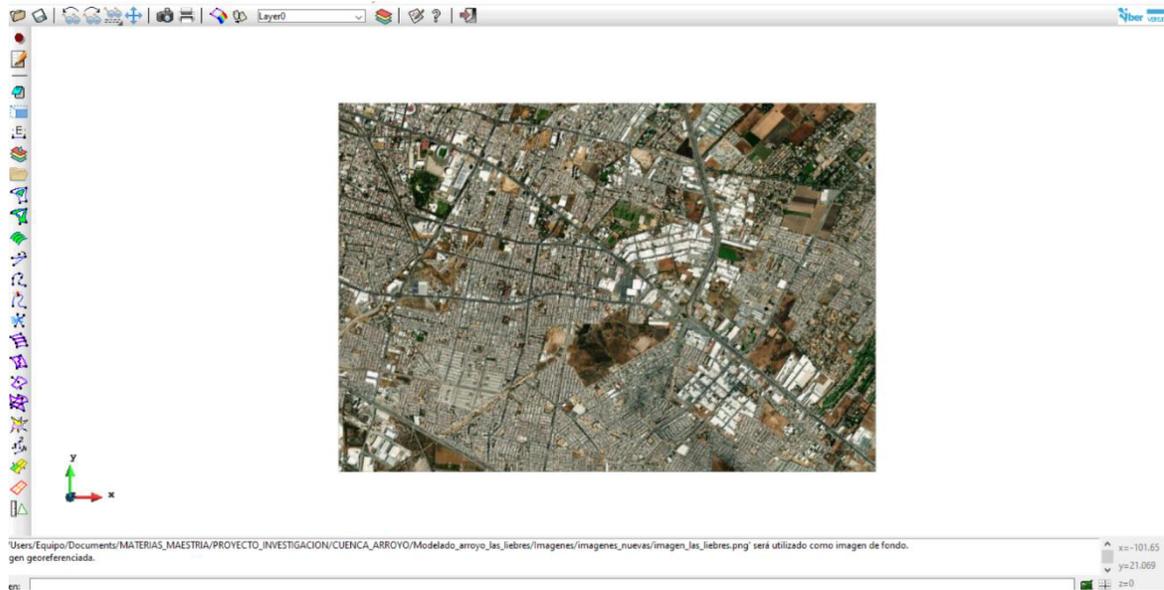


Figura 22. Imagen de fondo Georreferenciada.

5.3.2. Superficies de cálculo

Las superficies se generaron utilizando el sistema de información geográfica QGIS®, mediante la creación de polígonos sobre el Modelo Digital del Terreno. Estos polígonos se exportaron en formato Shapefile y se importaron posteriormente en el software IBER®. La Figura 23 muestra la superficie de cálculo que fue importada al modelo hidráulico.

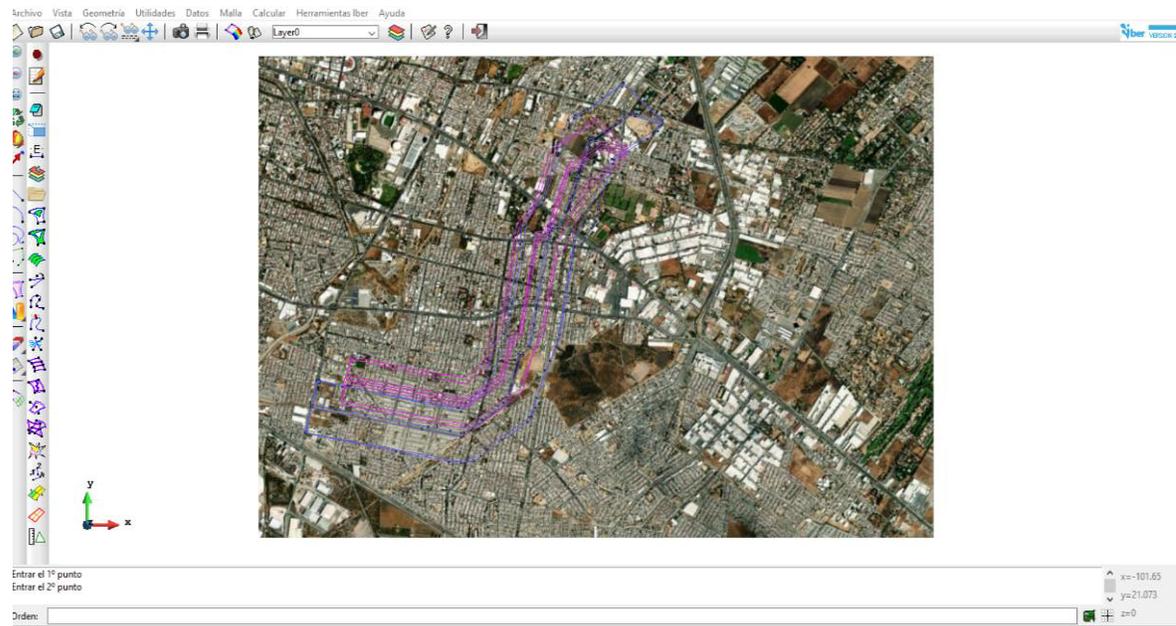


Figura 23. Superficie de cálculo del área de estudio.

5.3.3. Tipos de malla utilizada

El tipo de malla utilizada en el modelo construido fue de tipo irregular, la cual se adaptaba de mejor manera a nuestro caso de estudio, ya que es un cauce con una sección irregular (Figura 24). Los tamaños de malla se establecieron después de analizar la superficie a modelar y los tiempos de cálculo, la malla de cálculo se refinó realizando modelaciones de prueba que permitieran definir el tamaño óptimo para cada superficie. En la Figura 25 se presentan los tamaños de malla para el modelo numérico del tramo de estudio sobre el arroyo Las Liebres, lo cuales variaron desde 3 y 2.5 metros en las zonas contiguas y 2 metro en la zona del cauce. para poder definir el tamaño de malla óptimo, fue necesario realizar pruebas asignando diferentes valores o tamaños de malla, esto, para obtener resultados confiables y adecuados a la capacidad de cálculo de los ordenadores.

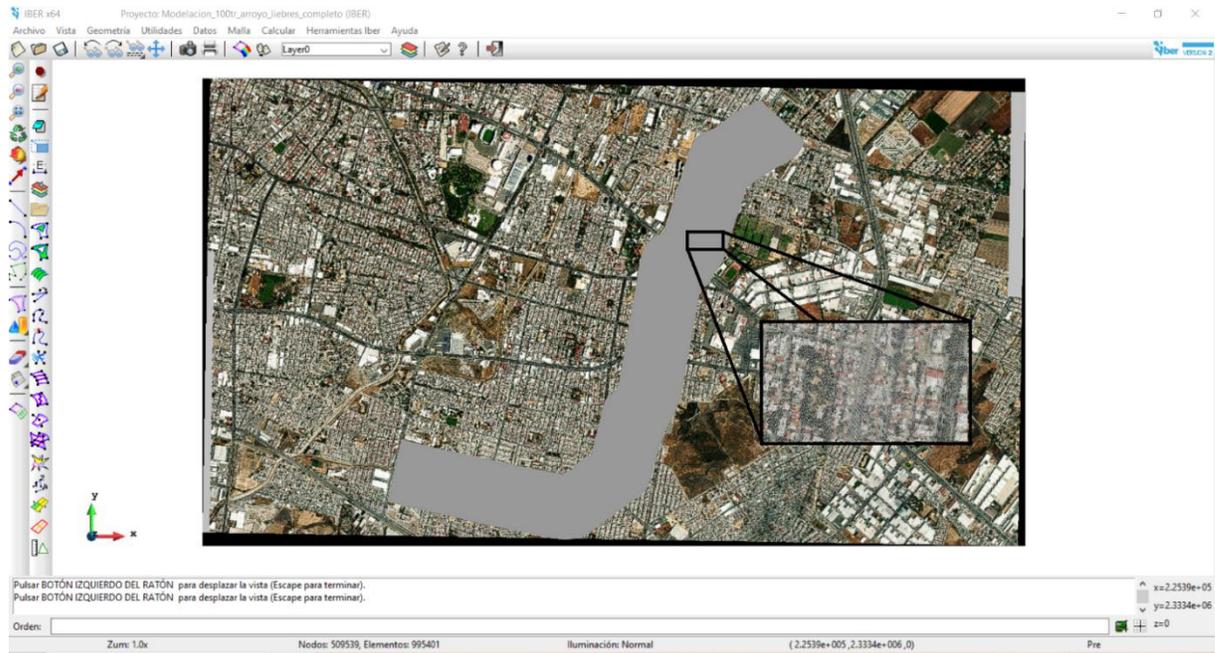


Figura 24. Malla de tipo irregular para la superficie de cálculo.

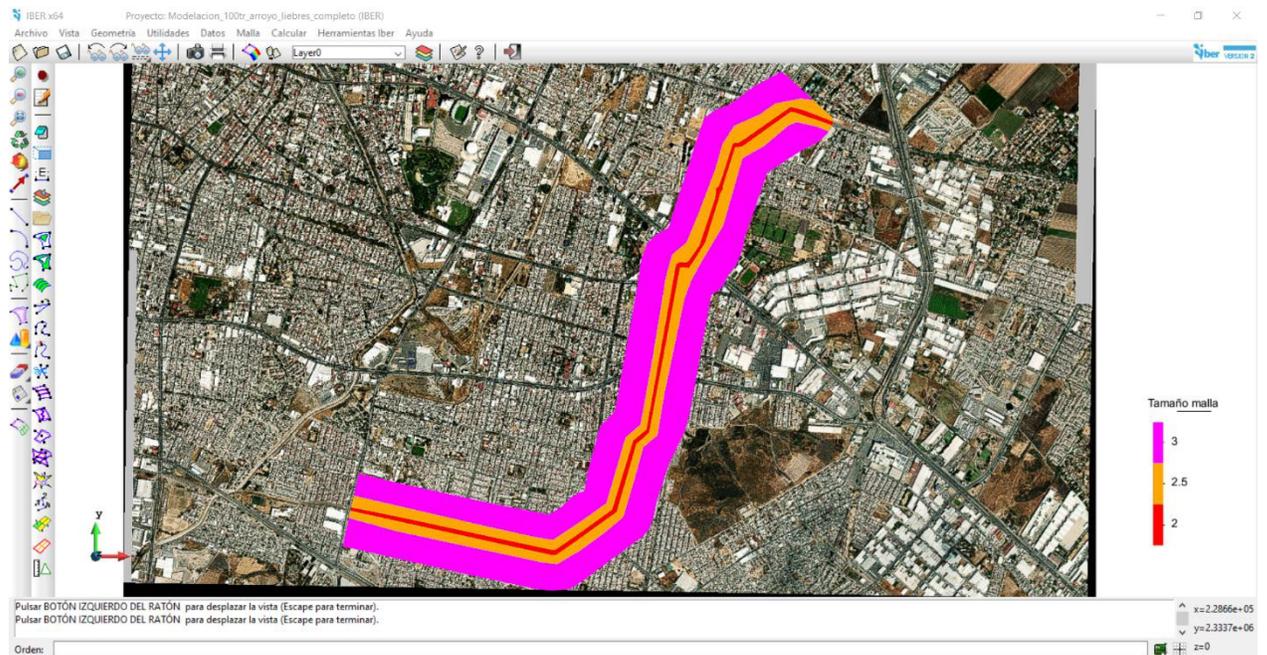


Figura 25. Tamaños de la malla para la superficie de cálculo.

5.3.4. Condiciones iniciales y de contorno

Las condiciones de contorno que se establecieron en el modelo fueron condición inicial, entrada y salida. La condición inicial asumida es que la superficie está completamente seca, esto es se asume una profundidad de agua o calado de 0.0 metros (Figura 26). La condición de entrada fue el hidrograma para diferentes periodos de retorno, siendo los escenarios de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. En la Figura 27 se muestra la condición de entrada establecida, la cual se define por el sitio donde comenzará a circular el flujo, en este caso se definió en el sitio aguas arriba del tramo de estudio.

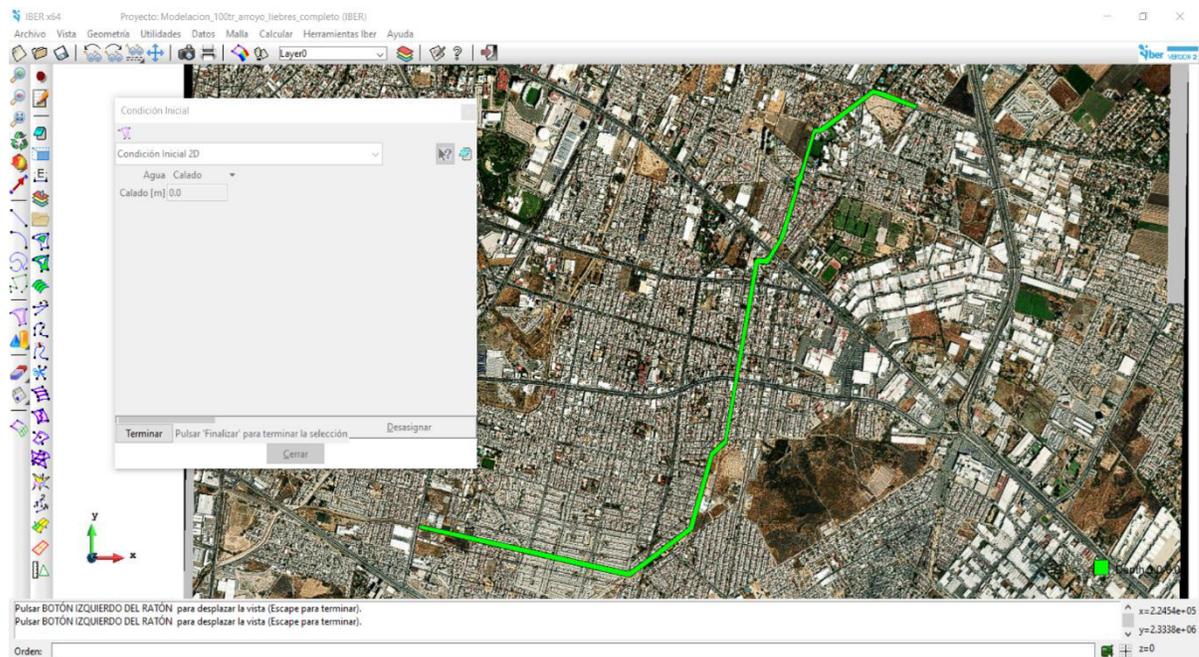


Figura 26. Condiciones de contorno del modelo.

En las condiciones de salida se identifican las zonas por donde puede salir el flujo del modelo, se consideró que el flujo es supercrítico al presentarse una crecida y por tanto un flujo no permanente. Se definieron como condición de salida toda la parte aguas abajo del modelo numérico y las zonas del costado derecho e izquierdo del arroyo, esto como consecuencia que se identificó que se desborda el cauce del arroyo cuando se presentan fuertes lluvias. En la Figura 28 se definen las condiciones de salida.

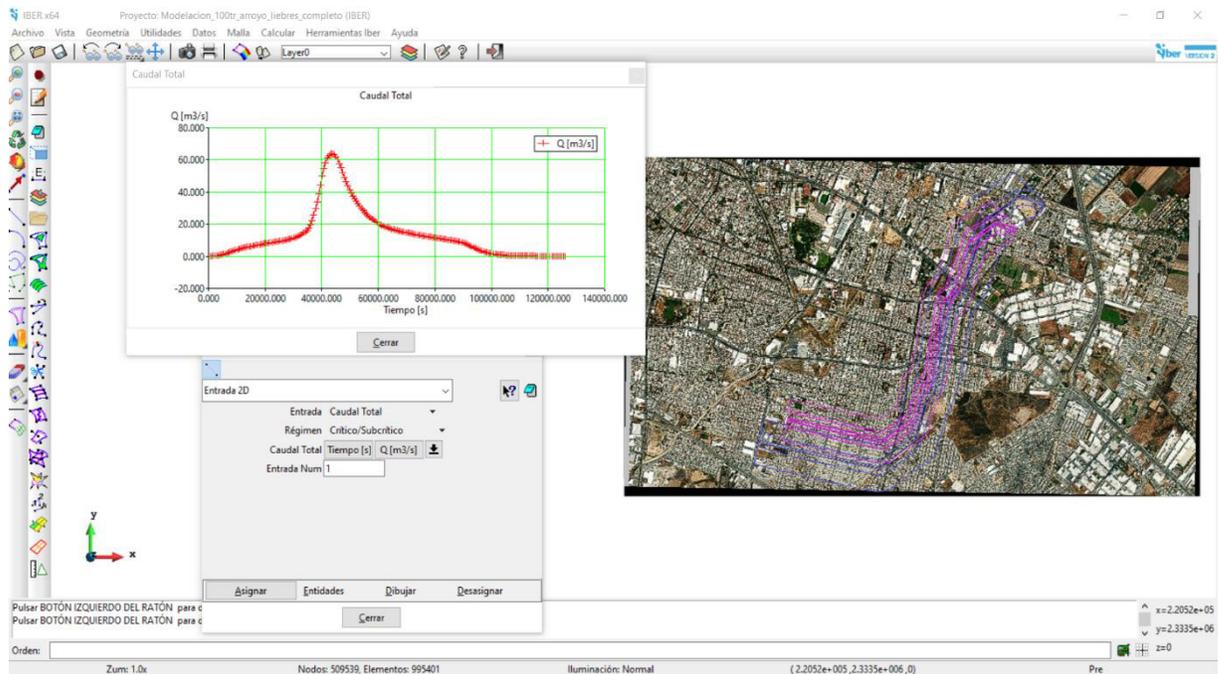


Figura 27. Condiciones de entrada.

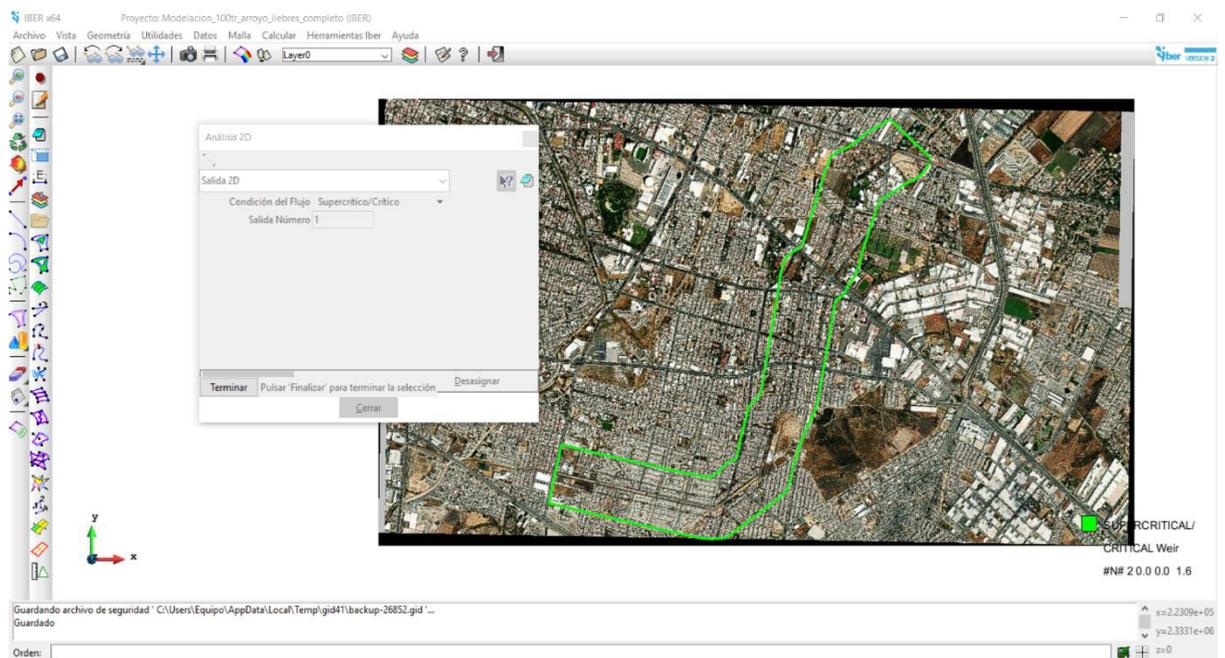
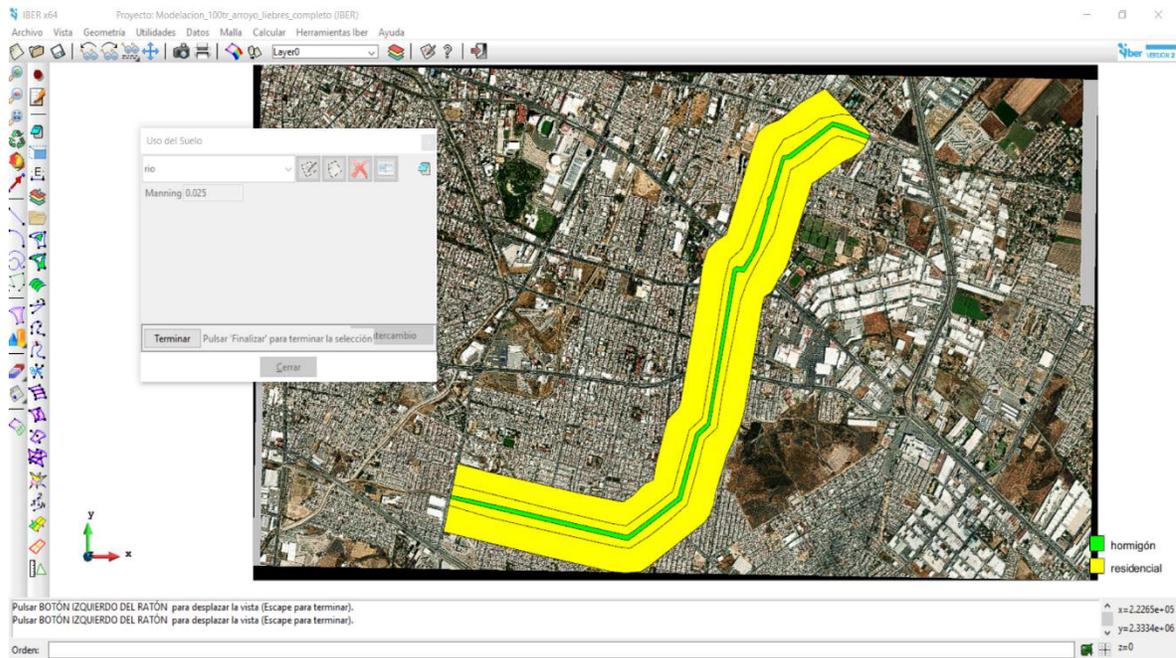


Figura 28. Condiciones de salida.

5.3.4. Usos de suelo en el modelo numérico

Los parámetros de uso de suelo se definieron para cada superficie en el modelo numérico, fue con base en la información que se asignaron los coeficientes de rugosidad. Entre los principales usos de suelo utilizados son: residencial y hormigón debido a que el arroyo tiene un recubrimiento



(Figura 29).

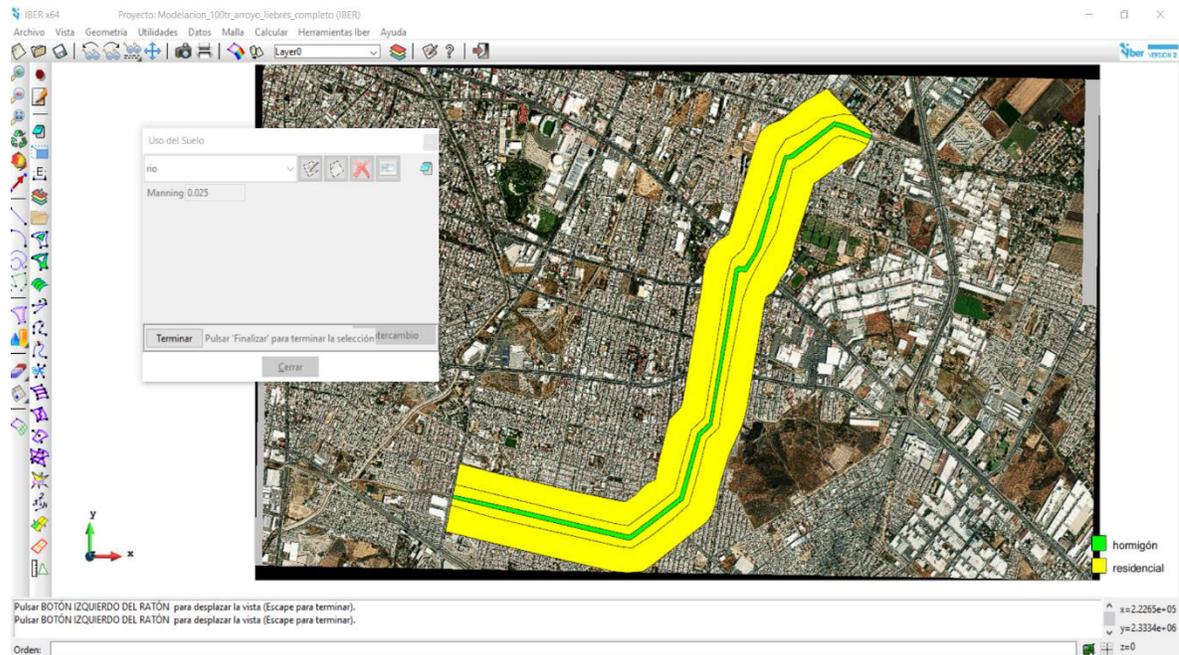


Figura 29. Usos de suelo establecidos para los coeficientes de rugosidad.

5.3.5. Tiempo de cálculo en IBER®

Los parámetros de tiempo establecidos en los modelos fueron de 600 segundos (2 minutos y 30 segundos) para el intervalo de resultados, mientras que el tiempo total de simulación fue de 12,600 segundos. El coeficiente de Courant durante de la modelación fue de 0.55, con lo que se tuvieron tiempo de cómputo de 8 horas por modelación, donde es importante que este coeficiente se debe manejar de forma que los resultados se mantengan dentro del rango permitido sin alterar los mismos.

Capítulo 6

6. Susceptibilidad a las inundaciones

En este apartado se presentan los mapas generados de la simulación hidrodinámica bidimensional implementado el esquema numérico del caso de estudio en el modelo IBER[®]. Los resultados se evaluaron para la condición estacionaria y no estacionaria.

6.1. Modelado estacionario

La simulación hidrodinámica bidimensional realizada con el modelo IBER[®] permite analizar el comportamiento del flujo de agua en el área de estudio de manera detallada y precisa. Mediante el modelo IBER[®], se implementó un esquema numérico adecuado para representar las características hidráulicas de la zona, considerando aspectos como la topografía, la rugosidad del terreno y las condiciones de contorno. Los mapas generados muestran visualmente los resultados obtenidos de la simulación, representando variables importantes como las velocidades del flujo, los niveles de agua y las áreas de inundación. Estos mapas proporcionan información valiosa para comprender la distribución espacial del flujo y la propagación de las inundaciones en la zona de estudio. En la **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura 30 y Figura 31, se pueden observar los campos de velocidades del flujo y de profundidad del agua que se generan con el hidrograma de la crecida para un $T_r=2$ años. El comportamiento hidráulico permite identificar que para este periodo, la lámina de agua fluctúa entre 0.01 a 4.07 m con velocidades que varían de 0 a 8.33 m/s presentando desbordamientos en la parte norte y sur del arroyo Las Liebres. Las velocidades del flujo no son relevantes en las zonas contiguas al arroyo, pero en el cauce del arroyo, dominan velocidades del flujo hasta de 8.33 m/s.

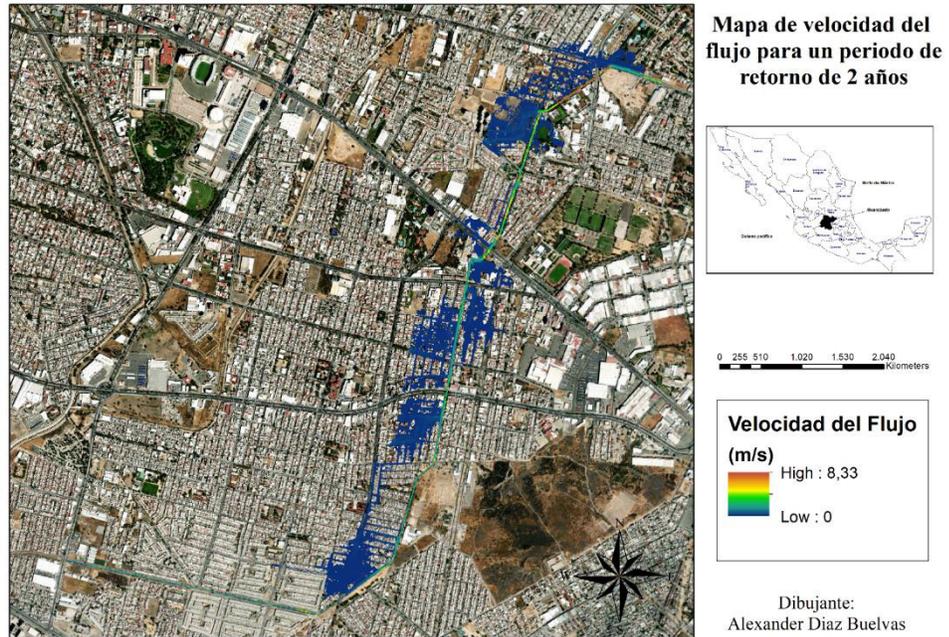


Figura 30. Campo de velocidades máximas alcanzadas con la crecida para el periodo de retorno de 2 años.

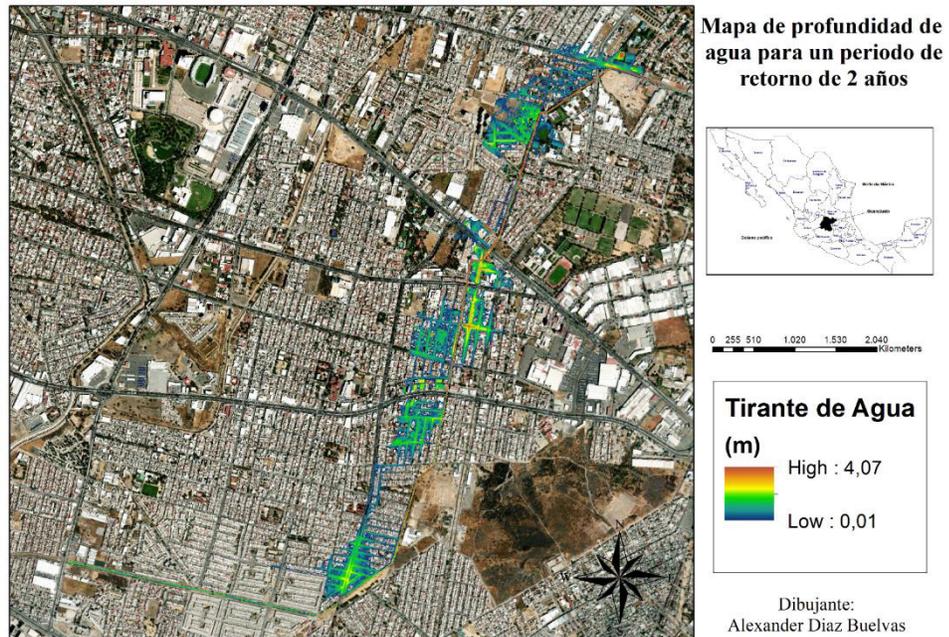


Figura 31. Mapa de profundidades máximas alcanzadas con la crecida para el periodo de retorno de 2 años.

Los resultados para los escenarios de $Tr=50$ años resumidos en la Figura 32 y Figura 33 se mantienen constantes y muy similares aumentando consigo la velocidad del flujo de agua a 10.11 m/s y la profundidad de agua a 4.17 m.

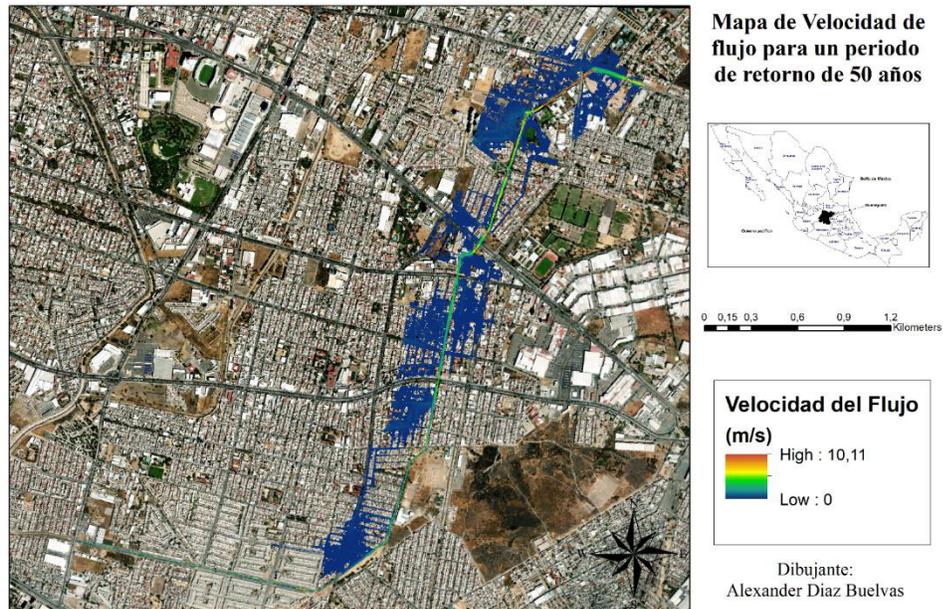


Figura 32. Campo de velocidades máxima alcanzadas con la crecida para el periodo de retorno de 50 años.

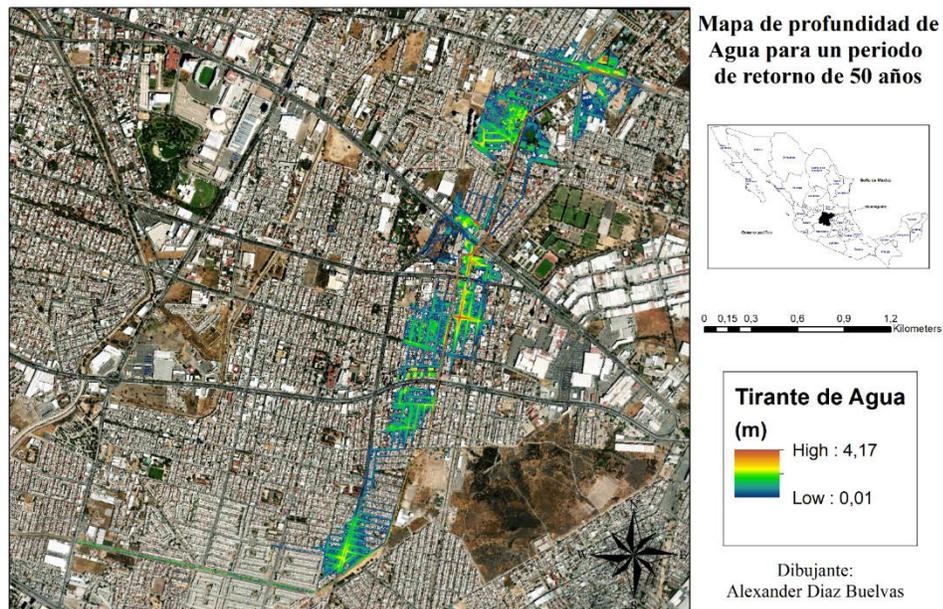


Figura 33. Profundidades máximas alcanzadas con la crecida para el periodo de retorno de 50 años.

Los resultados para el escenario considerado el más crítico, se resumen en la Figura 34 y Figura 35, en las cuales no solo sigue en aumento la velocidad del flujo y la profundidad del agua sino también la mancha de agua, es decir, que aumentan los sitios afectados por la crecida.

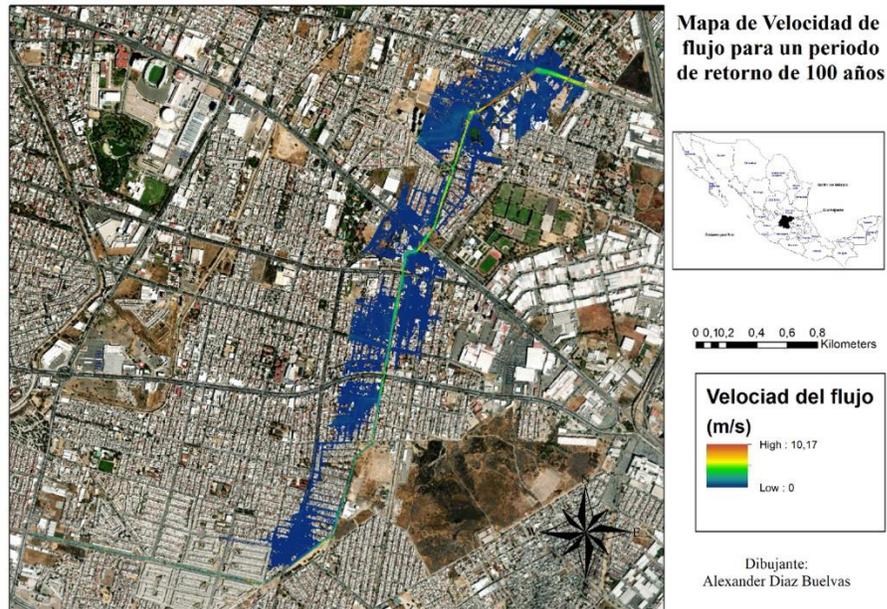


Figura 34. Campo de velocidades máxima alcanzadas con la crecida para el periodo de retorno de 100 años.

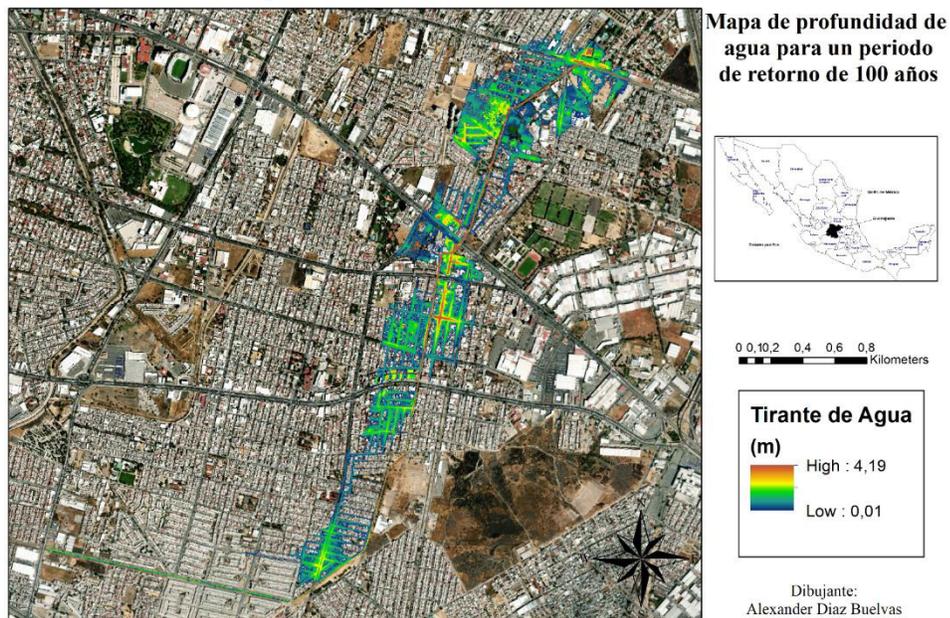


Figura 35. Profundidades máxima alcanzadas con la crecida para el periodo de retorno de 100 años.

6.2. Modelado no estacionario

Finalmente, se procesaron los mapas de campo de velocidades máximas y de profundidades máximas alcanzadas por las crecidas para el modelo no estacionario. Estos se realizaron para los periodos de retorno de 50 años y 100 años (presentados desde la Figura 36 a Figura 39) en este modelado se puede observar un crecimiento significativo en la mancha de agua y alcanzan velocidades máximas de flujo de agua por encima del modelo estacionario. Mientras que el tirante de agua disminuye en las zonas contiguas al cauce del arroyo, esto incluye las vías secundarias y terciarias.

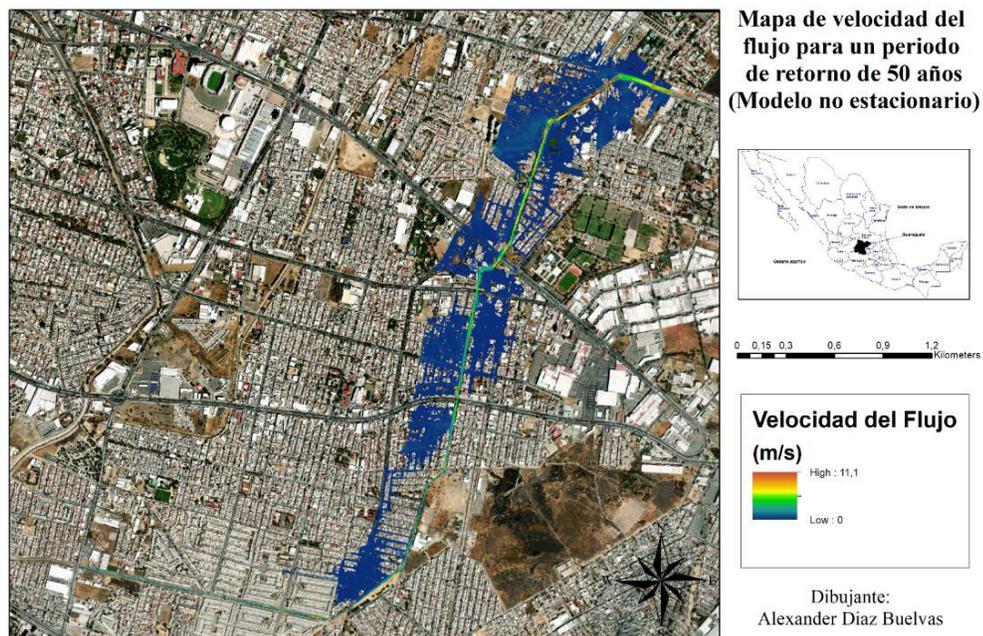


Figura 36. Campo de velocidades máxima alcanzadas con la crecida para el periodo de retorno de 50 años.

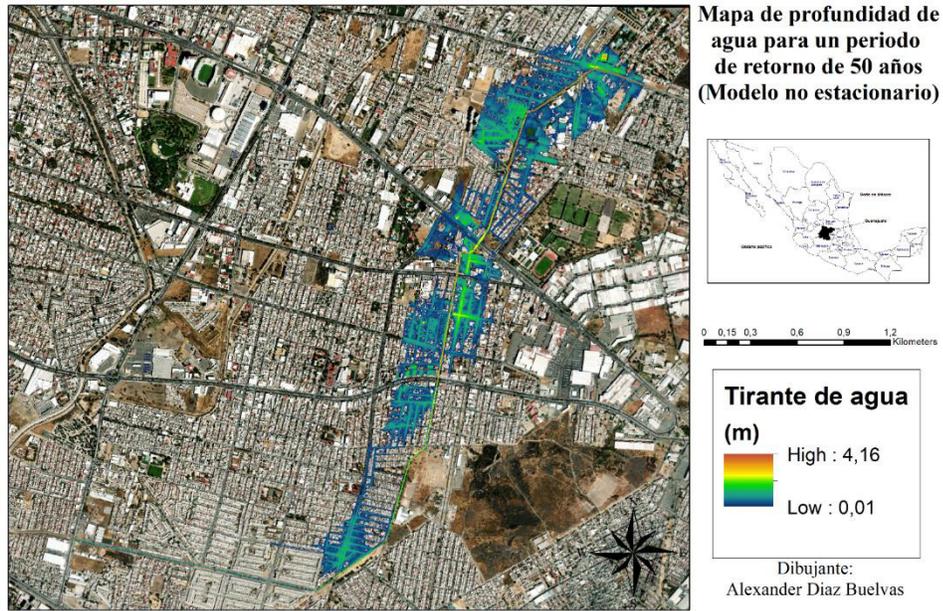


Figura 37. Profundidades máximas alcanzadas con la crecida para el periodo de retorno de 50 años.

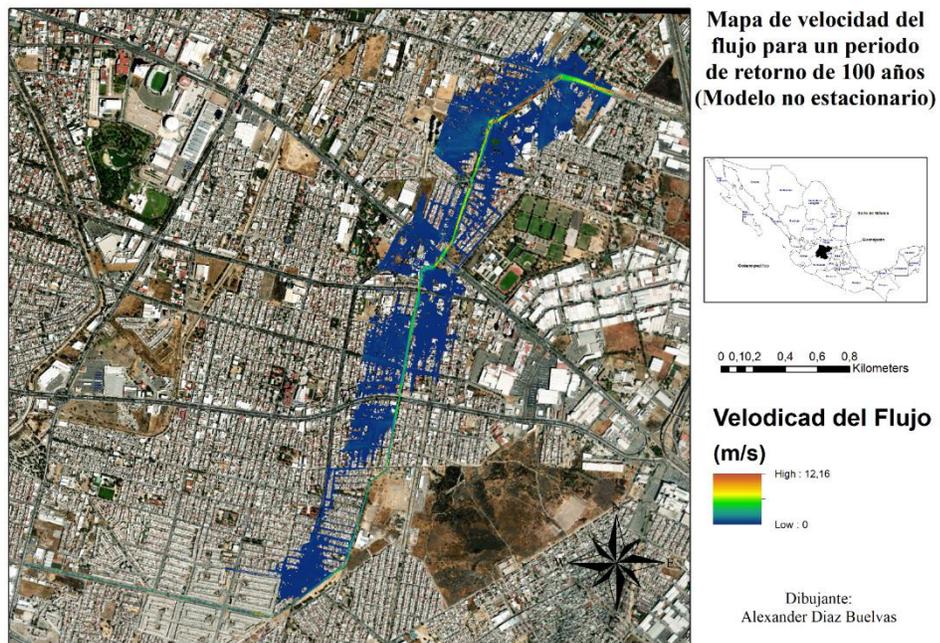


Figura 38. Campo de velocidades máxima alcanzadas con la crecida para el periodo de retorno de 100 años.

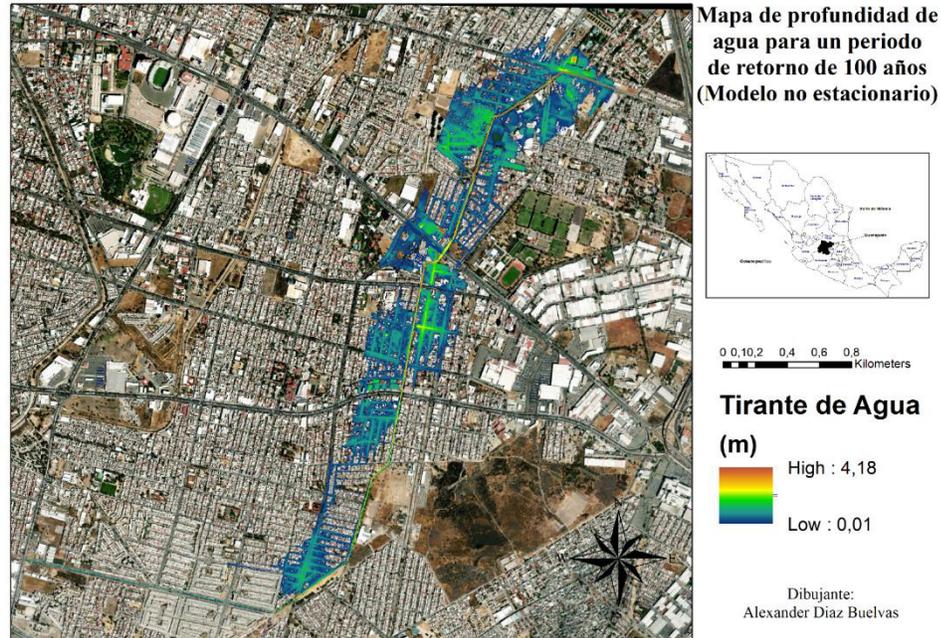


Figura 39. Profundidades máximas alcanzadas con la crecida para el periodo de retorno de 100 años.

6.3. Afectaciones en vialidades e infraestructura crítica

Las inundaciones pueden causar daños significativos en las vialidades e infraestructuras críticas, lo que tiene un impacto negativo en la movilidad, el acceso a servicios básicos y la capacidad de respuesta ante emergencias. Es por lo anterior, que en la investigación se evaluó mediante el modelado hidráulico la afectación a las vialidades circunvecinas e infraestructuras críticas producto del desbordamiento del arroyo Las Liebres. Para ello, se identificaron las vialidades afectadas por inundaciones con una profundidad de 10 a 30 cm. Se consideró que estas profundidades tienen un impacto significativo en el tránsito vehicular y peatonal en las vías. En las Figuras 40-42, se puede apreciar que una cantidad significativa de vialidades ubicadas en las proximidades del arroyo Las Liebres presentarán problemas de circulación debido a las inundaciones. Estos problemas afectarán la movilidad y el acceso a las zonas adyacentes, generando dificultades tanto para los vehículos como para los peatones. La afectación se presenta incluso para eventos con periodo de retorno de 2 años.

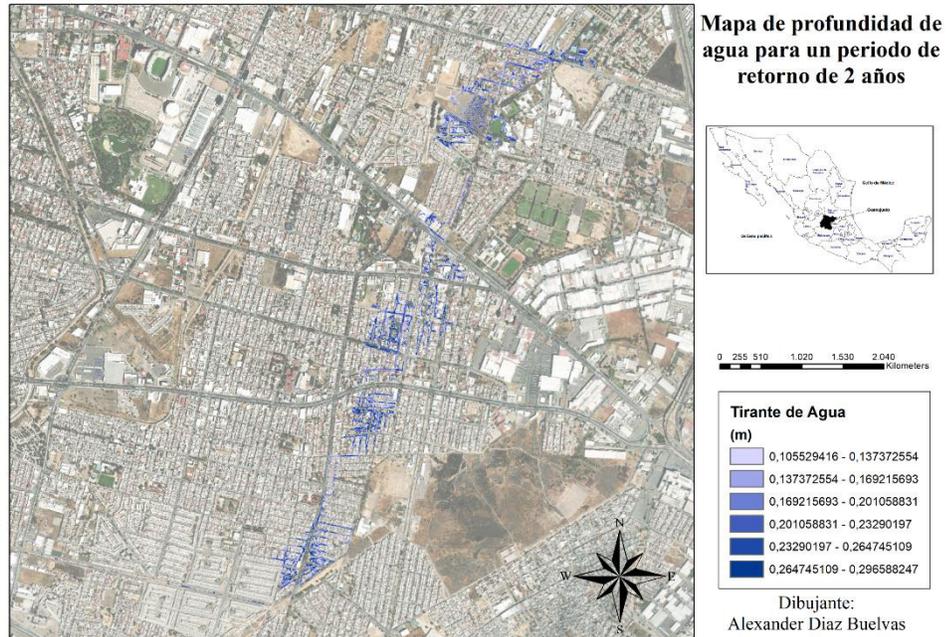


Figura 40. Profundidades máximas alcanzadas para el periodo de retorno de 2 años con una clasificación de altura de agua entre los 10 y 30 cm.

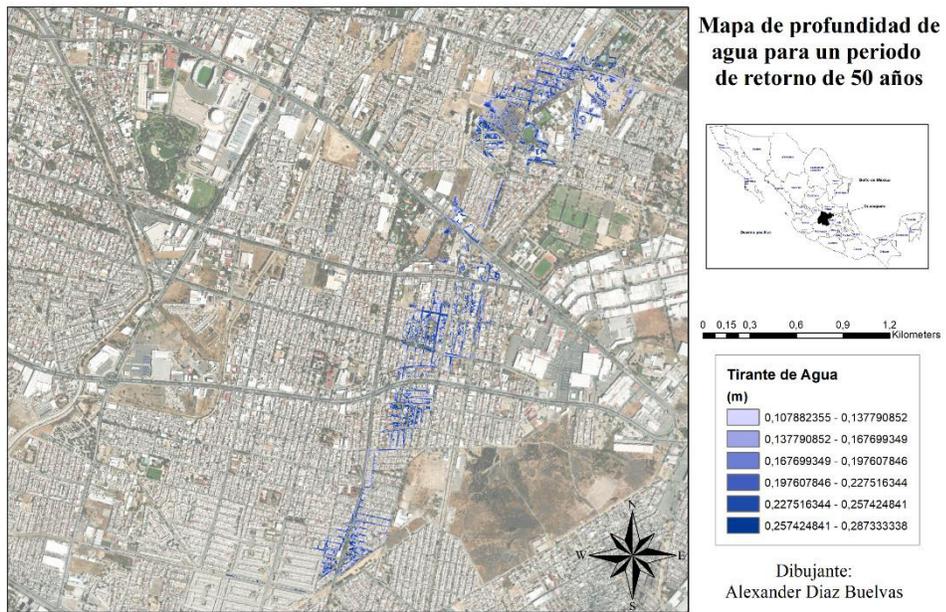


Figura 41. Profundidades máximas alcanzadas para el periodo de retorno de 2 años con una clasificación de altura de agua entre los 10 y 30 cm.

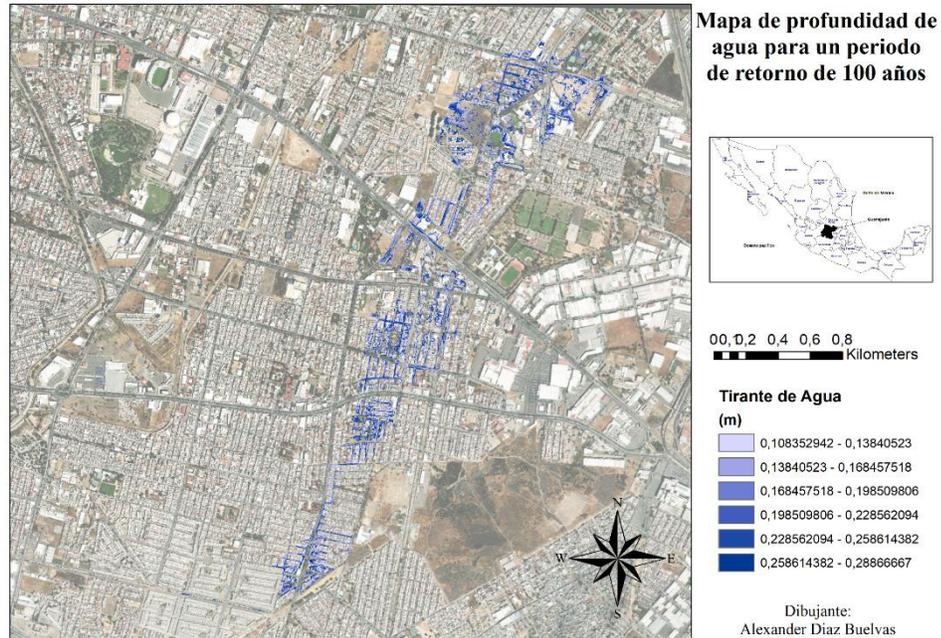


Figura 42. Profundidades máximas alcanzadas para el periodo de retorno de 100 años con una clasificación de altura de agua entre los 10 y 30 cm.

En el caso de las infraestructuras críticas afectadas por el desbordamiento del arroyo Las Liebres, se han identificado múltiples impactos significativos. Estas infraestructuras críticas incluyen instalaciones clave como centros de salud, escuelas, farmacias y otras (Figura 43). El desbordamiento del arroyo ha generado daños importantes en estas infraestructuras, comprometiendo su funcionamiento y capacidad para brindar servicios esenciales. Por ejemplo, los centros de salud pueden experimentar interrupciones en el suministro de energía eléctrica, daños en equipos médicos y dificultades para atender a los pacientes. Las escuelas pueden sufrir daños en las estructuras, afectando el entorno educativo de los estudiantes. Además, otros servicios críticos como el suministro de agua potable y el alcantarillado también pueden resultar afectados. Estos impactos en las infraestructuras críticas tienen consecuencias directas en la seguridad, el bienestar y la calidad de vida de las personas que dependen de estos servicios. Además, la recuperación y rehabilitación de estas infraestructuras pueden requerir esfuerzos significativos y recursos financieros para restaurar su funcionamiento normal.

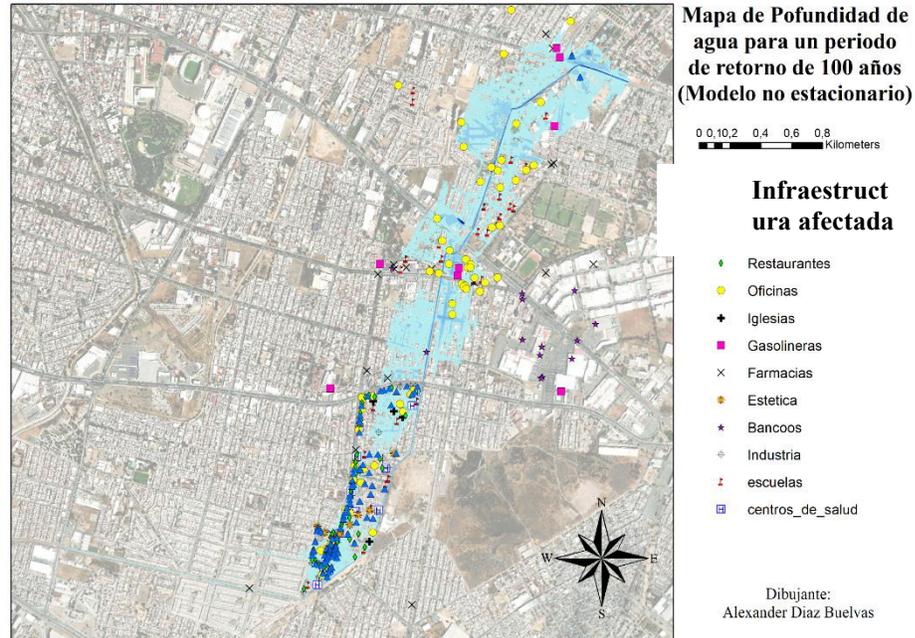


Figura 43. Mapa de profundidad de agua para un periodo de retorno de 100 años con la infraestructura afectada por las crecidas

En conclusión, las inundaciones y el desbordamiento del arroyo Las Liebres puede causar daños considerables en las infraestructuras críticas, lo que implica desafíos importantes en términos de restauración, planificación de emergencias y fortalecimiento de la resiliencia de estas infraestructuras ante eventos futuros.

7. Conclusiones

- A través del modelado se pudo identificar que además del área de afectación habitacional, también hay una afectación en el comercio y en infraestructuras prestadoras de servicios de salud.
- La recolección, organización y análisis de la información permitió identificar que la metodología más adecuada para la estimación de los gastos de diseño fue a través del análisis de frecuencias de los registros de precipitación; esto, como resultado de no contar con información de aforos de gastos.
- Se vio la necesidad de evaluar el comportamiento del arroyo con un modelo estacionario y no estacionario ya que la serie de datos tenía un comportamiento tendencial.
- Los resultados arrojados en los mapas de velocidad y profundidad nos muestran que el cauce no tiene la capacidad de transitar hidráulicamente los hidrogramas para las crecidas de todos los periodos de retorno simulados ya que desde el periodo de retorno de 2 años empiezan a presentarse contingencias de inundaciones en las zonas contiguas al cauce.
- Los parámetros numéricos establecidos en la implementación del modelo Iber, nos dieron una representación más aterrizada a la realidad del funcionamiento hidráulico del arroyo.
- Es necesario establecer proyectos urbanos de gestión de las aguas pluviales ya que es una necesidad urgente en el municipio de León Guanajuato por las contingencias causadas por el desbordamiento del cauce del arroyo las Liebres.
- Partiendo de la investigación realizada en este trabajo, da pie para una investigación futura relacionada a la afectación y la vulnerabilidad de la población debido a las fuertes inundaciones del arroyo las liebres.

Bibliografía

- Ahmad, T., Pandey, A.C. & Kumar, A. (2019) Evaluating urban growth and its implication on flood hazard and vulnerability in Srinagar city, Kashmir Valley, using geoinformatics. *Arab J Geosci* 12, 308. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4458-1>
- Ahmad, T., Pandey, A.C. & Kumar, A. (2020) Impact of 2014 Kashmir flood on land use/land cover transformation in Dal lake and its surroundings, Kashmir valley. *SN Appl. Sci.* 2, 681. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2434-8>
- Banco Mundial. 2017. Medidas de protección contra inundaciones basadas en la naturaleza: Principios y orientaciones para la implementación. Ed. Banco Mundial. Washington, DC, USA.
- Barredo, J. I. (2007) Grandes desastres por inundaciones en Europa: 1950–2005, *Nat. Hazards*, 42, 125–148.
- Bladé, E.C., 2010. IBER. Manual de Referencia Tècnica.
- Bladé, E.C., Sánchez-Juny, M., Sánchez, H.P., Ñiñerola, E., Gómez, M., 2009. Modelación numérica en ríos en régimen permanente y variable. Una visión a partir del modelo HEC-RAS. Universidad Politécnica de Barcelona, Barcelona.
- Borzi, G. E., F. Cellone, C. Tanjal, E. Melendi y E. Carol. 2020. Propuesta metodológica para el estudio de inundaciones en áreas de llanura con escasez de información. *Revista DYNA* 87(215):221-228. Doi: 10.15446/dyna.v87n215.85140.
- Cavazos, T. y Rivas, D. (2004). Variability of extreme precipitation events in Tijuana, Mexico. *Climate Research*, 25(3), 229-243. <https://doi.org/10.3354/cr025229>
- Cavazos, T., Turrent, C. y Lettenmaier, D. P. (2008). Extreme precipitation trends associated with tropical cyclones in the core of the North American monsoon. *Geophysical Research Letters*, 35(21). <https://doi.org/10.1029/2008GL035832>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred). 2019. Impactos socioeconómicos de los principales desastres ocurridos en México. Secretaría de seguridad y protección ciudadana. Ed. Centro Nacional de Prevención de Desastres. México, D. F., México. 232 p.
- Cervantes-Jaimes, C., Alcocer-Yamanaka, V., Arreguín-Cortés, F., Saavedra-Horita, R., & Rubio-Gutiérrez, H. (2012). Generación de mapas de riesgo de inundación. XXII Congreso Nacional de Hidráulica, 7-9 de noviembre, Acapulco, Guerrero, México.

- Chen, Z., Yin, L., Chen, X., Wei, S. y Zhu, Z. (2015), Investigación sobre las características del patrón de tormenta urbana en el área húmeda del sur de China: un estudio de caso de la ciudad de Guangzhou. *Int. J. Climatol.*, 35: 4370-4386. <https://doi.org/10.1002/joc.4294>
- Chow, V.T., Maidment, D.R. and Mays, L.W. (1989). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill
- Claudia R. Corona, Shemin Ge, Suzanne P. Anderson, (2023) Water-table response to extreme precipitation events, *Journal of Hydrology*, Volume 618, 129140, ISSN 0022-1694, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169423000823>)
- Darshana Duhan, Ashish Pandey, (2013) Statistical analysis of long term spatial and temporal trends of precipitation during 1901–2002 at Madhya Pradesh, India, *Atmospheric Research*, Volume 122, Pages 136-149, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809512003365>)
- Dena-O, Oscar S., Griselda Obeso C., Diane Doser, Jesús E. Leyva, E. Rascon, Francisco Gómez and Miguel Domínguez A. (2012). Using subsurface geophysical methods in flood control: A resistivity survey to define underground storage capacity of a sand body in Ciudad Juárez, Mexico. *Geofísica Internacional*
- Doocy, S., Daniels, A., Murray, S. y Kirsch, T. D. (2013). El impacto humano de las inundaciones: una revisión histórica de los eventos 1980-2009 y revisión sistemática de la literatura. *Corrientes PLoS*, 5, ecurrents.dis.f4deb457904936b07c09daa98ee8171a. <https://doi.org/10.1371/currents.dis.f4deb457904936b07c09daa98ee8171a>
- Duarte C., Alonso S., Benito G., Dachs J. y Montes C. (2006). *Cambio Global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2006.
- E. Bladé, L. Cea, G. Corestein, E. Escolano, J. Puertas, E. Vázquez-Cendón, J. Dolz, A. Coll (2014), Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos, *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, Volume 30, Issue 1, Pages 1-10, ISSN 0213-1315, <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>.
- Eckstein D., Künzel V., Schäfer L., (2021). GLOBAL CLIMATE RISK INDEX 2021, Federal Ministry for Economic Cooperation and Development Service. <https://www.dsn.gob.es/>
- Farfán, L. M., Barrett, B. S., Raga, G. B. y Delgado, J. J. (2021). Characteristics of mesoscale convection over northwestern Mexico, the Gulf of California, and Baja California Peninsula. *International Journal of Climatology*, 41(S1), E1062-E1084. <https://doi.org/10.1002/joc.6752>
- Fuentes, J. D. J. (2004). Análisis morfométrico de cuencas: Caso de estudio del Parque Nacional Pico de Tancitaro., Instituto Nacional de Ecología. Disponible en: (PDF) ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE LA CUENCA DEL RÍO PORTOVIEJO, MANABÍ, ECUADOR (researchgate.net)

- Galbán R., L. 2020. Inundaciones. Desafío de la naturaleza. Elementos teórico metodológicos sobre las inundaciones y su evaluación de riesgos. Serie: Prevención de riesgos y desastres (Núm.2). Ed. Kobo Writing Life. Santiago de Cuba, Cuba.
- Gama, L., E.M. Ordoñez, C. Villanueva-García, M. Arturo Ortiz-Pérez, H.D. López, R.C. Torres, and M.E.M. Valadez. (2010). Floods in Tabasco Mexico: history and perspectives. En Flood recovery, Innovation and Response II, edited by D. de Wrachien, D. Proverbs, C.A. Brebbia and S. Mambretti, 25-33.
- Global Natural Disaster Assessment Report 2021, (2022). Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Emergency Management - Ministry of Education. International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies. <https://reliefweb.int/report/world/2021-global-natural-disaster-assessment-report>
- Guha D., Hoyois P., Wallemacq P., Bellow R. (2017). Annual Disaster Statistical Review 2016: The numbers and trends. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) Institute of Health and Society (IRSS) Université catholique de Louvain – Brussels, Belgium. <https://reliefweb.int/report/world/annual-disaster-statistical-review-2016-numbers-and-trends>.
- Guha Sapir D. (2015), The human cost of weather related disasters (1995-2015) *centre for research on the epidemiology of disasters CRED*. <https://www.unisdr.org>
- Hammond, M. J., Chen, A. S., Djordjević, S., Butler, D., y Mark, O. (2015) Urban flood impact assessment: A state-of-the-art review, *Urban Water J.*, 12, 14–29.
- Harris, R., Loeffler, F., Rumm, A., Fischer, C., Horchler, P., Scholz, M., Foeckler, F. and Henle, K. (2020). Biological responses to extreme weather events are detectable but difficult to formally attribute to anthropogenic climate change. *Scientific Reports*, 10:14067. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70901-6>.
- Herrera, E., Magaña, V. y Morett, S. (2018). Relación entre eventos extremos de precipitación con inundaciones. Estudio de caso: Tulancingo, Hidalgo. *Nova scientia*, 10(21), 191-206. <https://doi.org/10.21640/ns.v10i21.1527>
- Huang, X., & Stevenson, S. (2021). Connections between mean North Pacific circulation and western US precipitation extremes in a warming climate. *Earth's Future*, 9(6), e2020EF001944. <https://doi.org/10.1029/2020ef001944>
- Huang, X., Stevenson, S., & Hall, A. D. (2020). Future warming and intensification of precipitation extremes: A “double whammy” leading to increasing flood risk in California. *Geophysical Research Letters*, 47(16), e2020GL088679. <https://doi.org/10.1029/2020GL088679>

- IPCC (2013) Resumen para responsables de políticas. En: Stocker TF, Qin D et al (eds) *Climate change 2013: the physical science basis*. Contribución del Grupo de Trabajo I al quinto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge University Press, Cambridge
- IPCC INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. (2012). Gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático. p.1-32.
- IPCC INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. (2013) Summary for policymakers. In: Stocker TF, Qin D et al (eds) *Climate change 2013: the physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge
- IPCC INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE.,(2018): Anexo I: Glosario [Matthews J.B.R. (ed.)]. En: *Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza* [Masson-Delmotte V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor y T. Waterfield (eds.)]
- Jonkman, S. N., & Kelman, I. (2005). Un análisis de las causas y circunstancias de las muertes por desastres por inundaciones. *Desastres*, 29(1), 75–97. <https://doi.org/10.1111/j.0361-3666.2005.00275.x>
- Jonkman, S. y Dawson, R. (2012). Issues and Challenges in Flood Risk Management—Editorial para el número especial sobre Flood Risk Management. *Agua*, 4(4), 785–792. <https://doi.org/10.3390/w4040785>
- Kite, G. W. (1977). Frequency and risk analyses in hydrology (Chapter 9, pp. 105-122 and chapter 12, 156-168). Fort Collins, USA: Water Resources Publications.
- Kreibich, H., Bubeck, P., Kunz, M., Mahlke, H., Parolai, S., Khazai, B., Daniell, J., Lakes, T., y Schröter, K. (2014) Una revisión de múltiples peligros y riesgos naturales en Alemania, *Nat. Hazards*, 74, 2279–2304.
- Kukulies, J., Prein, A. F., Curio, J., Yu, H., & Chen, D. (2023). Kilometer-scale multi-model and multi-physics ensemble simulations of a mesoscale convective system in the lee of the Tibetan Plateau: Implications

for climate simulations, *Journal of Climate* (published online ahead of print 2023). doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0240.1>

León-Cruz, J. F., Carbajal Henken, C., Carbajal, N. y Fischer, J. (2021). Spatio-Temporal Distribution of Deep Convection Observed along the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Remote Sensing*, 13(6), 1215. <https://doi.org/10.3390/rs13061215>

López, J. Javier, González, Miguel, Scaini, Anna, Goñi, Mikel, Valdenebro, José V., & Gimena, Faustino N.. (2012). Caracterización del modelo HEC-HMS en la cuenca de río Arga en Pamplona y su aplicación a cinco avenidas significativas. *Obras y proyectos*, (12), 15-30. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132012000200002>

Magaña, V., Pérez, J. y Méndez, M. (2003). Diagnosis and prognosis of extreme precipitation events in the Mexico City Basin. *Geofísica Internacional*, 42(2), 247-259. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2003.42.2.269>

Magaña, Víctor. , Luis Clemente López y Gustavo Vázquez. (2013). El pronóstico de lluvias intensas para la Ciudad de México. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas* (16): 18-25.

Marco, J.B., Cayuela, A. (1994). Inundación urbana: el concepto de ciudad planificada por inundaciones. En: Rossi, G., Harmancioglu, N., Yevjevich, V. (eds) *Coping with Floods*. Serie ASI de la OTAN, vol. 257. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-011-1098-3_43

Matías-Ramírez, Lucía Guadalupe., Oralia Oropeza-Orozco, JoséLugo-Hubp, Miguel Cortez-Vázquez, Ernesto Jáuregui-Ostos. (2007). Análisis de las principales causas de las inundaciones de septiembre de 2003 en el sur del estado de Guanajuato, México. *Investigaciones Geográficas* (64)

Meerow S., Newell J., & Stults M. (2016). Defining urban resilience: A review. *Landscape and Urban Planning*, 38-49.

Meylan, P., Favre, A. C., & Musy, A. (2012). Predictive hydrology. A Frequency analysis approach (Chapter 3, pp. 29-70). *Boca Raton, USA: CRC Press*.

Mockus, V. (1969). *National Engineering Handbook*, section 4: Hydrology. United States Department of Agriculture (USDA). Soil Conservation Service (SCS), Washington, D.C. Muestra los “impactos de los eventos climáticos extremos y los datos socio-económicos asociados” (p.1) <https://germanwatch.org/en/download/10343.pdf>. (Consultado febrero, 2022).

Ochoa, C. A., Conde, A. C., Welsh, C. M., Morales, M. A., Hayden, M. y Nava, M. E. (2014). Eventos extremos de precipitación en Veracruz: Impactos y efectos medioambientales. Serie A; 9. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología.

- O'Gorman, P. A., & Schneider, T. (2009). The physical basis for increases in precipitation extremes in simulations of 21st-century climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(35), 14773– 14777. <https://doi.org/10.1073/pnas.0907610106>
- OMM Organización meteorológica mundial (2021) *Atlas de la OMM sobre mortalidad y pérdidas económicas debidas a fenómenos meteorológicos, climáticos e hidrológicos extremos (1970-2019)*. OMM-N° 1267
- OMM Organización meteorológica mundial (2022) *Cambio climático y fenómenos meteorológicos extremos, El Día Meteorológico Mundial 2022 Alerta Temprana y Acción Temprana*. Consultado 20 de junio de 2023. <https://public.wmo.int>.
- ONU (2021) *Sequías, tormentas e inundaciones: el agua y el cambio climático dominan la lista de desastres*. ONU HABITAT. Consultado 20 de junio de 2023. <https://onuhabitat.org.mx>
- Pedrozo-Acuña, Adrián., J. Agustín Breña-Naranjo, and Ramón Domínguez-Mora. (2014). The hydrological setting of the 2013 floods in Mexico. *Weather* (69), 295-302
- Pendergrass, A. G., & Hartmann, D. L. (2014). Changes in the distribution of rain frequency and intensity in response to global warming. *Journal of Climate*, 27(22), 8372– 8383. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-14-00183.1>
- Pérez-Morga, N., Kretzschmar, T., Cavazos, T., Smith, S. V. y Muñoz-Arriola, F. (2013). Variability of extreme precipitation in coastal river basins of the southern Mexican Pacific region. *Geofísica Internacional*, 52(3), 277-291. [https://doi.org/10.1016/S0016-7169\(13\)71477-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7169(13)71477-6)
- Pfahl, S., O'Gorman, P. A., & Fischer, E. M. (2017). Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation. *Nature Climate Change*, 7(6), 423– 427. <https://doi.org/10.1038/nclimate3287>
- Protección civil (2018). Fenómeno hidrometeorológico en León Guanajuato. Secretaría de seguridad pública.
- Rao, A. R., & Hamed, K. H. (2000). Flood frequency analysis (Theme 1.8, pp. 12-21). *Boca Raton, USA*: CRC Press.
- Rivera-Trejo, Fabian., Gabriel Soto-Cortés, and Baldemar Méndez-Antonio. (2010). The 2007 flood in Tabasco, Mexico: an integral analysis of a devastating phenomenon. *International Journal of River Basin Management* (8): 255-267.
- Salas, J. D., Obeysekera, J., & Vogel, R. M. (2018). Techniques for assessing water infrastructure for nonstationary extreme events: A review. *Hydrological Sciences Journal*, 63(3), 325-352.

- Schär, C., Ban, N., Fischer, E.M. et al. (2016) Percentile indices for assessing changes in heavy precipitation events. *Climatic Change* 137, 201–216. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1669-2>
- Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana, Coordinación Nacional de Protección Civil, Centro nacional de Prevención de Desastres (2021) *Impactos socioeconómico de los principales desastres ocurridos en Mexico*. Resumen ejecutivo 2020.
- Stedinger, J. R., Vogel, R. M., & Foufoula-Georgiou, E. (1993). Frequency analysis of extreme events. In: Maidment, D. R. (ed.). *Handbook of hydrology* (Chapter 18, pp. 1-66). *New York, USA: McGraw-Hill Inc.*
- Tejeda-Martínez, Adalberto (2006). *Inundaciones 2005 en el estado de Veracruz (COVECYT y Universidad Veracruzana)*, ISBN 968-834-754-X.
- Tejeda-Martínez, Adalberto (2011). *Inundaciones 2010 en el estado de Veracruz (COVECYT y Universidad Veracruzana)*
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs & Population Division (2016). *The World's Cities in 2016: Data Booklet*. New York, United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division.
- Visser, J. B., Wasko, C., Sharma, A., & Nathan, R. (2023). Changing storm temporal patterns with increasing temperatures across Australia, *Journal of Climate* (published online ahead of print 2023). doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0694.1>
- Zand, M., Gholamrezaei, S., Daryabari, S. J. y Alijani, B. (2023). Detección del cambio climático mediante el análisis de la ocurrencia de eventos climáticos extremos en el oeste y suroeste de Irán. *Revista de Investigación del Clima*
- Zbigniew W. Kundzewicz, Iwona Pińskwar y G. Robert Brakenridge (2013) Grandes inundaciones en Europa, 1985–2009, *Hydrological Sciences Journal*, 58:1, 1-7, DOI: 10.1080/02626667.2012.745082
- Zucarelli, G. V. (noviembre-diciembre de 2013). Identificación de eventos hídricos extremos en la cuenca del río Paraná. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 4(5), 181-187. <https://www.scielo.org.mx>